

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM



БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •

ВЫПУСК 29

А. В. БЯЛКО

НАША ПЛАНЕТА – ЗЕМЛЯ





БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •

выпуск 29

А. В. БЯЛКО

НАША ПЛАНЕТА- ЗЕМЛЯ

Под редакцией
Я. А. СМОРОДИНСКОГО

4494

Мэ

КНИГ

Библиотека
Математического
Колледжа НМУ

Бескина



МОСКВА «НАУКА»

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1983

22.65
Б 99
УДК 525.2

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик И. К. Кикоин (председатель), академик А. Н. Колмогоров (заместитель председателя), доктор физ.-мат. наук Л. Г. Асламазов (учебный секретарь), член-корреспондент АН СССР А. А. Абрикосов, академик Б. К. Вайнштейн, заслуженный учитель РСФСР Б. В. Воздвиженский, академик В. М. Глушков, академик П. Л. Капица, профессор С. П. Капица, академик С. П. Новиков, академик Ю. А. Осипьян, академик АПН СССР В. Г. Разумовский, академик Р. З. Сагдеев, профессор Я. А. Смородинский, академик С. Л. Соболев, член-корреспондент АН СССР Д. К. Фаддеев, член-корреспондент АН СССР И. С. Шкловский

Бялко А. В.

Б 99 Наша планета — Земля. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. — 208 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 29). — 35 к.

В книге рассматриваются физические принципы, определяющие глобальные явления на Земле и планетах Солнечной системы. Их единство и взаимосвязь диктуются прежде всего природой нашей звезды — Солнца. Строению Солнца, ядерным реакциям, идущим в его недрах, устойчивости ядерного горения посвящена одна из глав книги. Физические условия на планетах зависят от их размеров, химического состава и расстояния от Солнца. Тепловое равновесие планет определяет строение планетных атмосфер и наличие на них океанов. Отчего возникает ветер, какова физическая природа облаков, как течениями переносятся воды океана, что влияет на климат Земли — ответы на эти вопросы в первом доступном школьнику приближении содержатся в книге.

Б 1705050000—152 205-83
053(02)-83

ББК 22.65
526

Б 1705050000—152 205-83
053(02)-83

© Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1983

ПРЕДИСЛОВИЕ

Мы живем, точно в сне неразгаданном
На одной из удобных планет...

Так писал в 1909 году Игорь Северянин. Под неразгаданным сном он имел в виду, полагаю, отнюдь не научную необъясненность удобства нашей планеты. Но интуиция поэта вкладывает в творчество дух его времени — это дает читателю возможность извлекать из строк стихотворения иногда больше того, что сам поэт имел в виду. Наше сегодняшнее понимание физических условий на поверхности Земли с тех пор выросло так, что назвать его сном уже нельзя. Это, скорее, состояние вскоре после пробуждения — логические связи уже установились, но полной ясности сознания еще нет.

Есть, однако, круг явлений, происходящих на Земле и в Солнечной системе, где основная цепь причин и следствий достаточно ясна. В этой книге пойдет речь о взаимосвязи и единстве астрономических и климатических явлений. Эта взаимосвязь основана на механике небесных тел и на тепловом равновесии планет в целом и их внешних оболочек — атмосфер. Известный советский геофизик А. С. Монин предложил термин *геономия* для науки, всесторонне изучающей Землю и ее космических собратьев. Назвать эту книгу популярной геономией было бы все же неверно. Здесь не будет рассказа о магнитных полях планет, нет здесь упоминания и об электрических и оптических феноменах в атмосферах.

Мы совершим мысленное путешествие по Земле и ее космическим окрестностям. Средством для этого путешествия будет знание основных законов природы. Теория даст возможность познакомиться и с такими местами, куда не проникнут даже космические аппараты, мы побываем, например, в центре Солнца. Но не описание окружающей природы будет главным. Описания эти, конечно, есть, но лишь как иллюстра-

ция к объяснениям явлений. Автор хотел бы рассказать, почему окружающий нас мир устроен именно так, чем определяется «удобство» нашей планеты, нашего большого дома.

Начнем мы с того, что установим, где эта улица, где этот дом в пространстве и во времени — расскажем об окружающей нас части Вселенной, о движении Земли вокруг Солнца. Попутно придется ввести несколько понятий, немного выходящих за рамки школьного курса физики. Они понадобятся и для последующего изложения.

Следующая глава описывает Землю и планеты не как материальные точки, но как вращающиеся тела — твердые, но податливые действующим силам. Вращению Земли посвящена книга академика А. А. Михайлова, выходящая в этой же серии. Здесь большее внимание будет уделено не астрономическим, а физическим следствиям вращения Земли.

Третья глава целиком посвящена Солнцу — главному источнику энергии и центру притяжения Солнечной системы. В четвертой главе рассказано, как солнечное излучение и химический состав определяют структуру атмосферы и океана, как возникают ветры и течения. Наконец, из последней главы вы узнаете, чем вызываются изменения климата нашей планеты. Здесь — как ни удивительно это на первый взгляд — окажется, что вариации климата на больших отрезках времени зависят, в частности, и от движения остальных планет. Так замкнется круг проблем, очерченный в книге.

ПУТЬ ЗЕМЛИ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВО ВРЕМЕНИ

1. Звездное небо

Посмотрите на небо ясной ночью. Множество звезд окружает нас. Вы знаете, что они удалены на расстояния, огромные по сравнению с земными масштабами. Вы вообще знаете уже совсем не мало об устройстве окружающего нас мира. Но постарайтесь ощутить это не книжным знанием, а сознанием непосредственным — почувствуйте, как малая песчинка мироздания, планета Земля, вращается и перемещается в пространстве. Не получилось? — Попробуйте еще раз, прочтя эту книгу.

Это будет рассказ о Земле и о воздействии на нее окружающей части Вселенной. Поэтому прежде всего нам нужно отчетливо ориентироваться в пространстве. Звездное небо и является нашей первой системой отсчета, фиксирующей направления во Вселенной. Звезды разнообразны. Одни ярко мерцают, другие — едва заметны. Цвет одних — голубоватый, других — желтый, третьи имеют красноватый оттенок. И расположены звезды неравномерно: есть участки неба, где они редки, а вот через весь небосклон проходит сливающаяся звездная полоса. Мы называем ее Млечным Путем. Млечный значит молочный. И древние греки называли это почти равномерно светящееся скопление звезд так же: киклос галактикос — круг молочный.

Если смотреть на небо долго или запомнить расположение звезд и посмотреть в другой раз, то легко заметить, что положение их изменилось. Но меняется оно — как целое. Поворачивается весь окружающий нас звездный мир. Вы, конечно, знаете, что на самом деле это Земля повернулась относительно него.

Чтобы нам было проще ориентироваться среди звезд, лучше пока отвлечься от вращения Земли.

Представьте себе, что вы космонавт и наблюдаете звездный мир с орбиты спутника. Тогда за пол-оборота, меньше чем за час, вы сможете оглядеть всю Вселенную. Рассеянный свет атмосферы не будет мешать — вы увидите звезды даже вблизи Солнца. В космосе звезды не мерцают, это явление вызвано движением воздуха. А главное — не нужно заботиться ни о времени суток, ни о географической широте места, ни о времени года — взаимное расположение звезд на небесной сфере практически неизменно.

И в древнем мире люди видели почти такую же картину звездного неба: относительное перемещение звезд за несколько тысяч лет очень невелико, поэтому созвездия сохранили свои очертания. Многие созвездия получили свои имена в глубокой древности. Строго говоря, созвездия — это 88 отдельных участков, покрывающих всю небесную сферу, их границы определены Международным астрономическим союзом в 1922—1930 годах. Созвездия исторически связаны с группами звезд, видимых невооруженным глазом, а древние названия созвездий, по-видимому, соответствуют фигурам, которые можно получить при их мысленном соединении. Нам неизвестны рисунки древних астрономов. На рис. 1 и 2 показано соединение звезд отрезками, которое недавно предложил американский астроном Г. Рей. Глядя, однако, на созвездия Льва и Водолея, хочется верить, что Рей лишь повторил картинку древних, тех людей, что дали названия созвездиям. До нас эти названия дошли от греков, но сами греки взяли за основу деление звездного неба на созвездия из Древнего Вавилона. Интересно, что в Древнем Китае группирование звезд в созвездия было совершенно иным.

На рис. 1 вдоль штриховой прямой расположены 12 созвездий, называемых созвездиями Зодиака: Овен (Υ), Телец ($\mathbf{\times}$), Близнецы (Π), Рак ($\mathbf{\odot}$), Лев ($\mathbf{\Omega}$), Дева ($\mathbf{\eta}$), Весы ($\mathbf{\neg}$), Скорпион ($\mathbf{m}$), Стрелец ($\mathbf{\nearrow}$), Козерог ($\mathbf{\times}$), Водолей ($\mathbf{\sim}$), Рыбы ($\mathbf{\ddagger}$). В скобках указываются астрономические знаки, придуманные в древности для сокращенного обозначения этих созвездий. Зодиак — греческое слово, означающее «звериный», хотя среди названий его созвездий не одни только звери. Рис. 1, а и 1, б — это плоские развертки ча-

сти звездного неба. Штриховая прямая на них изображает большой круг небесной сферы, она замкнута, а созвездия Зодиака цикличны: после Рыб снова идет Овен. Этот большой круг небесной сферы называется эклиптикой. Эклиптика — годичный путь среди звезд Солнца, наблюдаемого с Земли. Видеть звезды при Солнце нам мешает рассеянный в атмосфере солнечный свет. Однако еще люди древнего Вавилона понимали,

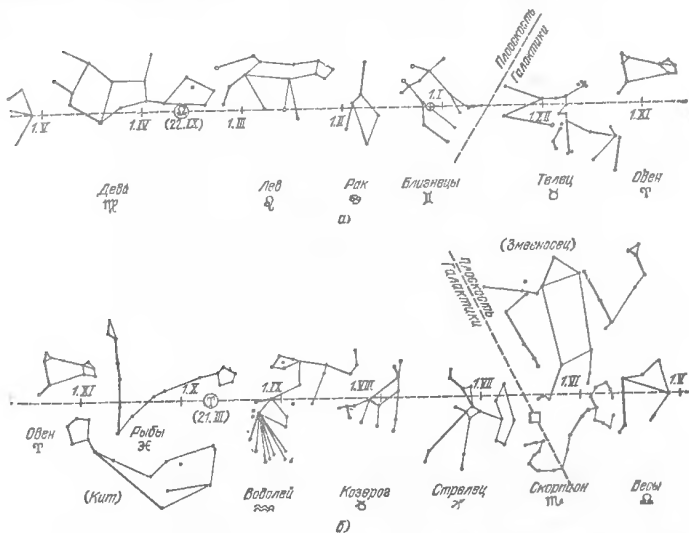


Рис. 1. а) Схема созвездий Зодиака. Горизонтальная штриховая прямая — эклиптика. На ней отмечены точка осеннего равноденствия $\times$ и направление на перигелий Земли $\oplus$. б) Схема созвездий Зодиака (продолжение). γ — точка весеннего равноденствия, $\square$ — направление на центр Галактики.

что звезды днем не исчезают, и умели рассчитывать, в каком созвездии в данный момент находится Солнце.

На рис. 1, кроме зодиакальных, изображены еще два созвездия: Змееносца и Кита. Змееносец находится на эклиптике; он, однако, не был включен древними в Зодиак, наверное, из-за своего страшного вида и чтобы число зодиакальных созвездий было «посчастливее». Созвездие Кита автор изобразил потому, что у Рея он получился очень симпатичный, а отчасти тоже из суеверных соображений.

Еще для ориентации нам понадобятся созвездия Северного полушария, они показаны на рис. 2. Центр этого рисунка, точка П, расположен относительно эклиптики так же, как северный полюс Земли относительно экватора, а направления к зодиакальным

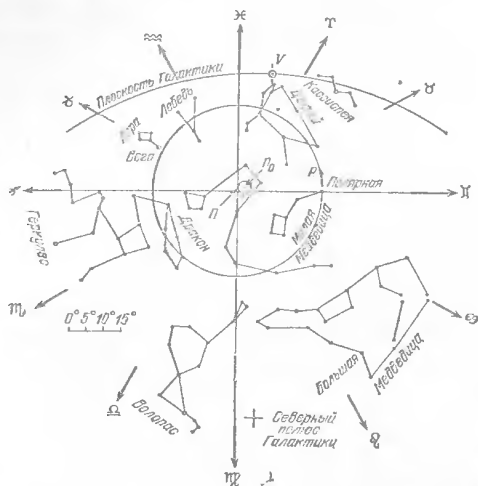


Рис. 2. Схема созвездий Северного полушария. Р — направление на полюс мира, большая окружность — его траектория; П — полюс эклиптики, малая окружность — его траектория; П₀ — направление момента Солнечной системы; V — направление скорости Солнечной системы в Галактике; + — северный полюс Галактики.

созвездиям показаны стрелками. Заметьте, что Полярная звезда не в центре рисунка, а около точки Р.

Астрономы умеют определять расстояния до звезд. Оказывается, лишь изредка звезды, расположенные рядом в созвездии, и на самом деле близки друг к другу. В большинстве случаев «соседние» звезды находятся на совсем разных от нас расстояниях и только зрительно совмещены.

Расстояния до звезд очень велики. Так, одна из ближайших к нам звезд, Вега из созвездия Лиры, находится на расстоянии $2,5 \cdot 10^{17}$ м, в полтора миллиона раз дальше, чем Солнце. Свет Веги доходит до нас через 26,5 лет. Именно такими большими расстояниями и объясняется тот факт, что расположе-

ние звезд в созвездиях практически неизменно. На самом деле звезды перемещаются друг относительно друга. Можно измерить их скорости. Оказывается, что характерная величина скоростей звезд составляет 100 км/с. Казалось бы, немало. Оценим, однако, через какое время звезда, движущаяся с такой скоростью перпендикулярно направлению на звезду, расположенная очень близко, скажем как Вега, сместится относительно других, далеких звезд, например, на 1 градус. Это время равно

$$t = \frac{1^\circ}{180^\circ} \pi \frac{2,5 \cdot 10^{17} \text{ м}}{10^5 \text{ м/с}} \simeq 4 \cdot 10^{10} \text{ с} \simeq 1400 \text{ лет.}$$

Есть, правда, звезды, перемещающиеся по небесной сфере и быстрее, чем на градус в полторы тысячи лет, но таких считанные единицы. Большинство изменяют свое положение намного медленнее — они расположены дальше Веги. Поэтому-то в древнем мире вид созвездий и был почти таким же, как сегодня. Заметьте, впрочем, что измениться он может не только из-за перемещения звезд, но и вследствие изменения светимости отдельных звезд. Известно, например, что о Бетельгейзе, теперь красной звезде, в древних китайских хрониках упоминалось как о звезде желтой. А достаточно даже одной из звезд созвездия из видимой невооруженным глазом стать заметной, и рисунок созвездия может резко измениться. Не потому ли нам и кажутся странными древние названия некоторых созвездий? К сожалению, пока еще нет возможности уверенно рассчитать в прошлое эволюцию большого числа звезд и восстановить их светимости в древности.

Как уже говорилось, звезды расположены на небесном своде, концентрируясь около Млечного Пути. В достаточно сильный телескоп видно, что и сам Млечный Путь состоит из отдельных звезд. Но они так тесно проектируются на небосвод, что невооруженному глазу представляются сплошным светящимся облаком. При наблюдении с Земли видно, что Млечный Путь простирается через все небо, от горизонта до горизонта. Но с точки зрения космонавта, который видит все звездное небо целиком, Млечный Путь замкнул — он является звездным поясом, окружающим нас. Древние греки каким-то образом догадывались

об этом — ведь они единственные из всех народов называли Млечный Путь кругом (киккос галактикос).

А мы используем слово Галактика для обозначения всей системы звезд, внутри которой расположены наше Солнце и Земля. При этом подразумеваем не круг на небесной сфере, а реальное трехмерное звездное объединение. Мы изучаем Галактику изнутри. Если же изобразить ее целиком так, как видел бы ее наблюдатель извне, то окажется, что она имеет довольно странную форму. Она имеет вид плоского круглого блина с утолщением в центре. Из центра в плоскости Галактики исходят спиральные «рукава», где плотность звезд сравнительно более высокая. Резкой границы Галактика не имеет.

В центре Галактики, в ее ядре, плотность звезд наибольшая. К сожалению, изучать ядро сложно, оно скрыто от нас межзвездным веществом, поглощающим свет. В этом месте — оно находится между созвездиями Стрельца и Скорпиона — Млечный Путь как бы раздваивается, оставляя посреди темную полосу. Из центра Галактики к нам доходит радиоизлучение и коротковолновое, рентгеновское излучение. Структуру галактического ядра удалось изучить также и в инфракрасном свете.

На рис. 1 и 2 показаны расположение галактической плоскости, направление на центр Галактики, северный галактический полюс. Солнце расположено в Галактике близко к середине галактического диска. Если бы это было не так, Млечный Путь не выглядел бы поясом, не лежал бы вдоль большого круга небесной сферы, а представлялся бы ярким пятном, занимающим обширную часть звездного неба. Расстояние от Солнца до центра Галактики около $a_{\odot} \simeq 3 \cdot 10^{20}$ м, оно в два миллиарда раз превосходит расстояние от Земли до Солнца $a_{\oplus} = 1,5 \cdot 10^{11}$ м.

Звезды Галактики обращаются вокруг ее ядра в соответствии с законом всемирного тяготения. Проекция вектора галактической скорости Солнца обозначена на рис. 2 точкой V, этот вектор лежит в плоскости Галактики. Это означает, что наше светило всегда находилось в галактической плоскости. По величине скорость орбитального движения Солнечной системы $v_{\odot} \simeq 250$ км/с. Период нашего обращения во-

круг центра Галактики можно оценить как $2\pi a_{\odot}/v_{\odot} \simeq 7 \cdot 10^{15}$ с, т. е. двести с лишним миллионов лет.

Закон всемирного тяготения дает возможность узнать ту часть массы Галактики, которая находится внутри орбиты Солнца. Полная масса Галактики близка к этой оценке по порядку величины:

$$m_{\Gamma} \sim \frac{v_{\odot}^2 a_{\odot}}{G} \sim 3 \cdot 10^{41} \text{ кг.}$$

Буквой G обозначена гравитационная постоянная $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$. Масса Галактики больше, чем 10^{11} масс Солнца. Примерно такое число звезд и входит в Галактику.

2. Космологическая шкала времени

Чем дальше удален от нас космический объект, тем, естественно, слабее его воздействие. Однако малость одного воздействия по сравнению с другим еще недостаточна для того, чтобы слабым возмущением можно было безусловно пренебречь. Поясним это примером.

Наибольшая сила, действующая на Землю, — это гравитационное притяжение Солнца. Сравнительно с ней сила притяжения к центру Галактики ничтожно мала: $(a_{\oplus}/a_{\odot})^2 m_{\Gamma}/m_{\odot} \sim 3 \cdot 10^{-11}$. Можно ли ею пренебречь? Ответ зависит от того промежутка времени, в течение которого нас интересует движение. Если это годы — несколько оборотов Земли вокруг Солнца — то пренебречь воздействием тяготения Галактики, конечно, можно. Но если имеются в виду сотни миллионов лет, что сравнимо с периодом обращения по галактической орбите, то именно малая, но постоянная сила притяжения Галактики становится главной силой, определяющей траекторию Земли. Солнечное же тяготение приводит только к малым колебаниям траектории Земли около галактической орбиты Солнца — заметьте, что скорость галактического движения почти вдесятеро больше скорости Земли относительно Солнца.

Для изучения космических воздействий на нашу планету, конечно, достаточно ограничиться движением Земли в Солнечной системе и движением Солнца в Галактике. Но временная шкала, которая нам

понадобится, больше, чем период обращения по галактической орбите. Поэтому расскажем подробнее о самых больших отрезках времени, о времени космологическом. Для этого сперва нам придется вернуться к описанию окружающего нас пространства, выйдя за пределы Галактики.

Кроме Галактики, существует множество таких же огромных звездных систем, похожих и непохожих на нашу. Их называют галактиками (со строчной буквы). Ближайшие к нам галактики — Большое и Малое Магеллановы Облака — видны жителям Южного полушария Земли. Они удалены от нас на расстояние $1,6 \cdot 10^{21}$ м, а размеры этих галактик около $2 \cdot 10^{20}$ м. Магеллановы Облака имеют неправильную форму и значительно уступают по массе нашей Галактике. Они гравитационно с ней связаны, т. е. являются ее спутниками.

В большие телескопы можно различить колоссальное число галактик, порядка 10^{11} , удаленных на огромные расстояния, достигающие 10^{26} м. Галактики распределены в пространстве неравномерно, большинство из них собраны в скопления галактик. Скопления, в свою очередь, имеют тенденцию к объединению в сверхскопления. И тем не менее, в самых больших масштабах Вселенная представляется заполненной веществом довольно равномерно — даже число сверхскоплений в видимой ее части еще достаточно велико.

В начале тридцатых годов американский астроном Э. Хаббл наблюдениями доказал, что скорости удаленных галактик направлены от нас. Более того, чем дальше расположена галактика, тем быстрее она убегает. Скорости галактик пропорциональны расстояниям до них — это утверждение называется законом Хаббла. Найти точно коэффициент пропорциональности трудно — слишком далек масштаб расстояний во Вселенной от наших земных эталонов длины. Величина постоянной Хаббла H лежит в пределах от 50 до 100 км/(с·Мпс). Она показывает, на сколько возрастает скорость разбегания галактик при удалении на каждый мегапарсек. Парсек, астрономическая единица длины, равен расстоянию, с которого радиус земной орбиты виден под углом $1''$. Легко вычислить: мегапарсек равен $3,086 \cdot 10^{22}$ м. Переведем

постоянную Хаббла из астрономических единиц в физических, сократив размерности длины. Тогда $H \sim 3 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$.

Вся картина расширяющейся Вселенной выглядит так, как будто весь мир вначале был сжат в точку, а затем взорвался и разлетается. Чем с большей скоростью вылетела материя, тем дальше успела она удалиться. Самые далекие из обнаруженных галактик удаляются со скоростью, сравнимой со скоростью света. Мы увидим в дальнейшем, что полной аналогии между обычным взрывом и расширением Вселенной нет. Тем не менее, вполне закономерен вопрос: сколько времени прошло с момента этого Большого Взрыва?

Чтобы ответить на этот вопрос, нужно, кроме закона Хаббла, знать, как замедляется разлет гравитационным притяжением всей Вселенной. Этой и другими задачами, касающимися нашего мира в целом, занимается наука космология. С ней вы можете ознакомиться подробнее, прочтя, например, книгу И. Д. Новикова «Эволюция Вселенной». В самом первом приближении, пренебрегая гравитацией, оценить возраст Вселенной несложно. Считая, что галактики разлетаются со скоростями, не зависящими от времени, получим:

$$t_0 \sim H^{-1} \sim 3 \cdot 10^{17} \text{ с} \sim 10^{10} \text{ лет.}$$

Более точные расчеты показывают, что возраст Вселенной лежит в пределах от 14 до 20 миллиардов лет. Время, отсчитанное от момента начала расширения, называют космологическим.

Потрясает воображение тот факт, что такая не-тривиальная картина расширяющегося мира была предсказана теоретически еще до того, как была обнаружена наблюдениями. В 1922 году советский ученый А. А. Фридман показал, что большинство решений уравнений А. Эйнштейна для мира в целом — нестационарны, зависят от времени, что расширение Вселенной есть наиболее естественное следствие уравнений тяготения. Фридман за свою недолгую жизнь (1888—1925) провел ряд интереснейших исследований по математике и теории атмосферы Земли. Свою работу «О кривизне пространства», опубликованную до обнаружения разлета галактик и

первого определения постоянной Хаббла, Фридман заканчивает словами: «Считая M равной массе $5 \cdot 10^{21}$ наших Солнц, будем для периода мира иметь величину порядка 10 миллиардов лет». Здесь под величиной M понимается масса видимой Вселенной. Немного в науке примеров столь глубокой проницательности!

Существуют и часы, пригодные для измерения промежутков времени в миллиарды лет. Такие возможности дают радиоизотопные методы. Они основаны на том, что некоторые изотопы химических элементов не стабильны, а самопроизвольно распадаются. Изотопы при этом превращаются из одних в другие. Но всегда и независимо от внешних условий число радиоактивных атомов и масса изотопа убывают со временем по закону

$$m(t) = m(0) 2^{-t/T_{0.5}}.$$

Здесь $m(0)$ — начальная масса изотопа, а $T_{0.5}$ — период полураспада, постоянная величина, сугубо индивидуальная для каждого изотопа, — время, за которое распадается половина начального его количества.

Периоды полураспада у разных изотопов совершенно различны. Короткоживущие ядра атомов распадаются за миллионные доли секунды, есть изотопы, у которых $T_{0.5}$ равно нескольким секундам, у других оно — минуты, сутки, годы. Известно более тысячи изотопов элементов таблицы Менделеева. Из них 278 стабильны или имеют периоды полураспада, значительно превышающие возраст Вселенной. Распределение периодов полураспада остальных изотопов приведено на рис. 3. Из него видно, что большая часть нестабильных изотопов имеет характерные времена жизни от минуты до недели, но немало и долгожителей. Их и используют для радиоактивной датировки.

Различные изотопы химических элементов образуются при ядерных реакциях в центральных областях звезд. С некоторыми из этих процессов мы познакомимся на примере нашей звезды, Солнца. Еще одна возможность образования нестабильных изотопов — ядерные реакции в высоких слоях атмосферы под действием быстрых частиц космических лучей. Например, именно таким образом земная атмосфера

обогащается углекислотой с изотопом углерода ^{14}C . Его период полураспада 5570 лет. Измеряя содержание ^{14}C в древесине, можно установить время, когда росло дерево, когда оно синтезировало органические соединения из атмосферной углекислоты.

Изотопы с периодами полураспада в $10^5 - 10^7$ лет звездного происхождения уже не сохранились в земной коре. На Земле эти изотопы стали возникать

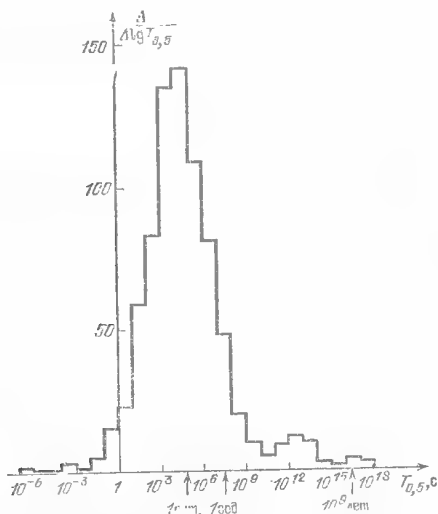


Рис. 3. Распределение периодов полураспада изотопов.

только после 1945 года в результате ядерных взрывов и управляемых ядерных реакций.

Наконец, несколько изотопов имеют периоды полураспада, сравнимые с возрастом Вселенной. Это два изотопа урана ^{233}U и ^{238}U , торий ^{232}Th , калий ^{40}K и стронций ^{87}Sr . Они свидетели тех времен, когда происходило образование Солнечной системы. По относительной концентрации их самих и продуктов их распада можно установить возраст древнейших образцов пород — время, прошедшее с момента последнего затвердевания. Исследования земных и лунных пород, а также вещества метеоритов показывают, что в окружающей нас части Солнечной системы нет вещества старше 4,6 миллиарда лет. Поэтому

считается, что Солнечная система образовалась около 5 миллиардов лет назад.

Замечательно, что найденный радиоизотопными методами возраст Солнечной системы не противоречит возрасту Вселенной, определенному по разбеганию галактик, но меньше его и того же порядка величины.

Помните, Смердяков спрашивает слугу Карамазова, Григория:

— Свет создал господь бог в первый день, а солнце, луну и звезды на четвертый день. Откуда же свет-то сиял в первый день?

За что был бит.

3. Свет Большого Взрыва

Сиял ли свет до образования галактик и звезд? Да. Большой Взрыв, прослеживаемый по разбеганию галактик, разогрел вещество Вселенной до очень высоких температур. При расширении эта температура падала, изменялось и излучение, равномерно заполнившее Вселенную. Но этот первичный свет существует и сегодня — невидимый глазу, он регистрируется радиотелескопами.

Прежде, однако, чем рассказать подробнее об этом первосвете, давайте познакомимся с законами теплового излучения*). Вы, конечно, замечали, что чем сильнее раскалено нагретое тело, тем ярче оно светится. С ростом температуры усиливается тепловое хаотическое движение молекул, увеличивается частота их столкновений. Оказывается, эти явления сопровождается и усиление хаотического электромагнитного поля, именно его мы и называем естественным светом.

Если излучение тела достаточно долго взаимодействует с нагретой средой, оно приходит в тепловое равновесие. Тогда свойства его определяются только температурой среды. Это излучение называется излучением абсолютно черного тела. Почему черного? — Дело в том, что для достижения теплового равнове-

*) Ознакомиться подробнее с физикой теплового излучения можно, например, по книге Я. А. Смородинского «Температура» (серия «Библиотека «Квант», вып. 12).

сия тело должно хорошо поглощать падающий свет, при этом поглощенная энергия компенсируется тепловым излучением. Тела же, почти полностью поглощающие свет видимого диапазона, выглядят черными.

Людвиг Больцман — выдающийся австрийский физик прошлого века — установил закон теплового излучения: плотность потока световой энергии абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени температуры,

$$S = \sigma T^4.$$

Плотность потока S , называемая еще интенсивностью излучения, есть энергия, излучаемая единицей площади тела в единицу времени. Поэтому коэффициент пропорциональности σ — постоянная Стефана — Больцмана — имеет размерность Дж/(м²·К⁴). В 1900 году немецкий физик Макс Планк доказал квантовую природу теплового излучения. После этого оказалось возможным выразить постоянную Стефана — Больцмана через фундаментальные постоянные: скорость света c , постоянную Планка $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ кг·м²/с и постоянную Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К:

$$\sigma = \frac{\pi^2}{60} \frac{k^4}{\hbar^3 c^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ кг/(с}^3 \cdot \text{К}^4\text{)}.$$

Макс Планк занимался объяснением спектра теплового излучения. Спектр есть распределение интенсивности света по частотам — это функция частоты света ω (связанной с длиной волны $\lambda = 2\pi c/\omega$), показывающая, какая доля энергии приходится на интервал частот $d\omega$ *). Планк первым ввел понятие о квантах света, фотонах, и с помощью этого нового физического представления теоретически объяснил наблюдаемые спектры абсолютно черного тела:

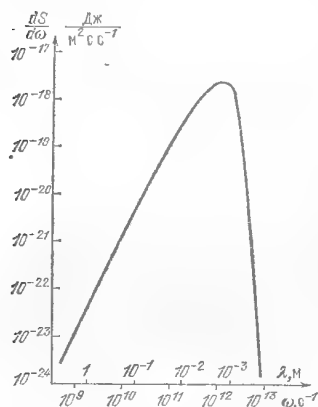
$$\frac{dS}{d\omega} = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \frac{\omega^3}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}.$$

*) Конечно, можно было бы писать вместо дифференциала более привычное $\Delta\omega$ — малый интервал частот. Дифференциал и следует воспринимать, как малое приращение, малое настолько, что и переменная — в данном случае ω , — и функция практически не изменяются.

Слева стоит интенсивность излучения частоты ω , отнесенная к спектральному интервалу $d\omega$. Ее размерность Дж/(м²·с·с⁻¹). Хотя секунды в размерности, конечно, можно сократить, так написанная размерность полнее отражает физическую суть величины $\frac{dS}{d\omega}$.

В знаменатель правого выражения входит степень числа $e = 2,718...$, основания натуральных логарифмов. Тепловой спектр имеет максимум при частоте

$\omega_m = 2,82 kT/h$. Если графически изобразить зависимость спектра излучения $\frac{dS}{d\omega}$ от частоты, то



площадь под кривой даст в точности больцмановскую величину интенсивности σT^4 . Таким образом, и интенсивность равновесного теплового излучения, и частота максимума его спектра, и вся спектральная зависимость определяются только одним параметром — температурой.

Рис. 4. Спектр теплового излучения Вселенной с температурой 3 К.

На рис. 4 построен спектр излучения абсолютно черного тела при

температуре 3 К. Оказывается, именно такая сейчас температура теплового излучения Вселенной. Это излучение и есть дошедшее до нас свидетельство высоких температур в начале расширения мира. По этой причине оно называется реликтовым, т. е. оставшимся от далекого прошлого. Существование реликтового излучения Вселенной было предсказано в 1946 году русским физиком-теоретиком Георгием Гамовым. Он оценил современную температуру Вселенной в 10 К — отличие от истинной температуры совсем небольшое.

Из рис. 4 видно, что максимум спектральной кривой реликтового излучения приходится на длину волны в несколько миллиметров. Такое электромагнитное излучение относится к радиодиапазону, оно, ко-

нечно, не регистрируется зрением. Обнаружили трехградусное черное излучение Вселенной американские радиоастрономы А. Пензиас и Р. Вильсон в 1965 году.

Возникает естественный вопрос: почему измеряемая сегодня температура Большого Взрыва так низка? Ведь при 3 К только гелий может оставаться жидким, столь низкие температуры так и называют — гелиевыми. Как-то не вяжется такая температура с представлением о взрыве. Представим себе радиотелескоп, принимающий реликтовое излучение. Откуда оно приходит к нам? Как давно оно было излучено? Какая поверхность его испустила, какое вещество?

Еще ряд вопросов возникает в связи с тем фактом, что тепловое излучение Вселенной со всех сторон одинаково. В какую бы часть небосвода ни был направлен радиотелескоп, он примет излучение одной и той же температуры с различием в пределах тысячных долей. И даже эти малые отклонения, как мы увидим ниже, имеют свое объяснение.

Постараемся ответить на все эти вопросы качественно — для их количественного истолкования понадобилось бы более строгое введение понятий космологии. Взгляните на рис. 5. В точке А, условно изображены Земля и радиотелескоп, принимающий реликтовое излучение. Вы уже знаете, что текущий момент космологического времени $t_0 \sim 10^{10}$ лет. Если сегодня мы принимаем излучение, испущенное в момент t_1 , это означает, что оно прошло путь $c(t_0 - t_1)$. Скорость света c — наибольшая скорость передачи любой информации. Ясно, что мы принципиально не можем иметь никаких сведений с расстояний, больших ct_0 . Изобразим сплошной дугой часть сферы этого радиуса. Точки внутри нее в заштрихованной области мы принципиально видеть могли бы. Однако свет, излучаемый там, сильно поглощается. Происходит это потому, что при малых космологических временах плотность и температура вещества велики —

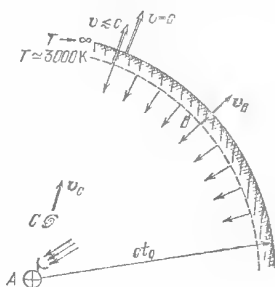


Рис. 5. Схема расширения Вселенной и распространения реликтового излучения.

оно находится в состоянии плазмы и непрозрачно для света.

Рекомбинация космической плазмы, т. е. соединение электронов с ионами в нейтральные атомы, произошла, когда температура Вселенной была равна примерно 3000 К. Момент рекомбинации t_1 отстоял от пачала расширения всего на 1—1,5 миллиона лет. Тогда вещество Вселенной из черного, сильно поглощающего свет, и стало прозрачным. Моменту рекомбинации соответствует сфера радиуса $c(t_0 - t_1)$, изображенная на рис. 5 пунктиром. Излучение этой поверхности и воспринимается радиотелескопом. Но почему же мы не видим добела, до трех тысяч градусов раскаленный небосвод, а регистрируем температуру, в тысячу раз меньшую?

Вспомните, Вселенная расширяется. Поверхность рекомбинации относительно недалеко от предельной сферы радиуса ct_0 . Поэтому она удаляется от нас со скоростью, очень близкой к скорости света. Вы знаете об эффекте Доплера: если источник волн движется относительно приемника излучения, то принимаемая частота отличается от испущенной. Вселенная расширяется — поэтому мы воспринимаем излучение убегающих галактик смещенным в красную сторону, к более длинным волнам. Поверхность же, излучающая реликтовый свет, удаляется очень быстро, со скоростью, лишь на тысячную долю меньшей скорости света. Поэтому все частоты теплового при 3000 К излучения этой поверхности уменьшаются в тысячу раз. Во столько же раз уменьшается и наблюдаемая температура, поэтому радиотелескопы и «видят» излучение при 3 К.

Трудность в понимании строения Вселенной состоит в осознании равноправия всех ее точек: Вселенная однородна. Глядя на рис. 5, можно прийти к ошибочному выводу, что мы находимся в центре мира. Предельная сфера радиуса ct_0 , однако, отнюдь не является границей Вселенной, — это только расширяющаяся сфера нашей информации о мире. Например, предельная сфера для наблюдателя из галактики С будет иной. Чтобы показать, как проявляется однородность Вселенной, расскажем о ее эволюции еще раз, выбрав начало координат в одной из точек, откуда сегодня к нам приходит реликтовое

излучение, в точке B . Будем последовательно изображать часть Вселенной в разные моменты космологического времени, на тех стадиях ее расширения, когда существенно меняется ее структура или состав.

Начнем при этом (рис. 6, a) с момента, отстоящего всего на несколько секунд от начала Большого

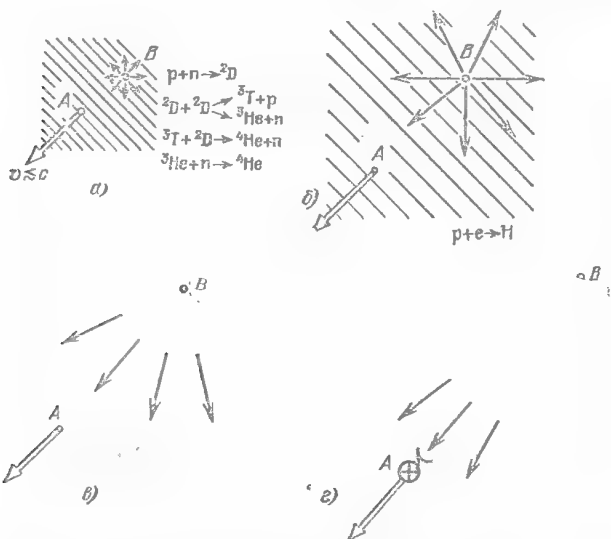


Рис. 6. Распространение реликтового излучения: a) в момент космологического синтеза элементов $t \simeq 1$ с; $б$) в момент рекомбинации $t \simeq 10^6$ лет, $T \simeq 3000$ К; $в$) на стадии образования галактик, $t \simeq 10^9$ лет, $T \simeq 15 + 20$ К; $г$) современное состояние $t \simeq 10^{10}$ лет, $T = 3$ К.

Взрыва. Температура при этом по порядку величины составляет 10^{10} К. Вселенная в этот момент непрозрачна, излучение высокой температуры, исходящее из точки B , поглощается на очень малом расстоянии от нее. Излучает, конечно, каждая точка, в том числе и точка A , в которой впоследствии образуется наша Галактика. Точка A удаляется от точки B из-за расширения. Эта стадия эволюции мира интересна тем, что именно тогда из протонов и нейтронов образуются ядра изотопов первых элементов: дейтерия 2D , гелия 3He и 4He , лития 7Li . Теоретические расчеты показывают, что этот первичный синтез элемен-

тов дает изотопа ${}^4\text{He}$ 25—27% по массе, а 73—75% вещества остается в виде протонов, ядер водорода ${}^1\text{H}$. Доли остальных образующихся изотопов весьма малы: дейтерия порядка 10^{-4} , гелия-3 около $3 \cdot 10^{-5}$, лития $10^{-9} \div 10^{-10}$. Более тяжелые элементы в этот момент вообще не образуются; как и когда они появились в нашем мире, будет рассказано в гл. III. Наша уверенность в правильном понимании процессов, происходящих на столь ранней стадии, основана на том, что состав Вселенной на более поздних этапах расширения по наблюдениям именно таков.

На рис. 6, б показана Вселенная в момент рекомбинации водорода при температуре 3000 К. (Гелий рекомбинировал несколько раньше, когда температура была вдвое большей.) Рассеивают и поглощают свет главным образом электроны, не связанные в нейтральных атомах. В этот момент примерно половина всех электронов еще свободна, но при понижении температуры доля свободных электронов резко упадет — Вселенная станет прозрачна.

На рис. 6, в изображен промежуточный момент, когда излучение от точки В еще не достигло точки А. Туда, однако, доходит свет от более близких точек. Физически эта стадия расширения выделена тем, что под действием гравитационного притяжения нарушается первоначальная полная однородность распределения вещества, во Вселенной формируются скопления галактик и сами галактики. Температура реликтового излучения на этом этапе эволюции Вселенной равна $15 \div 20$ К.

Наконец, рис. 6, г показывает современный момент. Радиотелескоп принимает реликтовое излучение, дошедшее до нас из точки В. Как уже говорилось, мы удаляемся от нее с околосветовой скоростью и, в силу эффекта Доплера, видим спектр излучения Вселенной не при 3000 К, а при 3 К.

А теперь представьте себе такой мысленный опыт. Установим радиотелескоп на космическом корабле и разгоним этот корабль до значительной скорости. Будет ли реликтовое излучение по-прежнему изотропным, одинаковым со всех сторон космического корабля? — Нет. Ведь теперь его движение создает избранное направление в фотонном газе, наполняющем Вселенную. Поэтому реликтовое излучение будет

восприниматься с разным доплеровским сдвигом в зависимости от того, как направлен радиотелескоп к курсу корабля. Это означает, что можно измерить скорость корабля по зависимости температуры реликтового излучения от направления.

Стоп. А нужен ли космический корабль? Проверим сначала, не движется ли сама Земля относительно черного излучения Вселенной. Такой эксперимент действительно был поставлен в 1979 году. Он показал, что температура теплового излучения оказывается на 0,1% выше, если радиотелескоп направлен к созвездию Льва и на столько же ниже, если он направлен к созвездию Водолея. Вывод: Солнечная система движется со скоростью около 400 км/с относительно системы координат, в которой температура реликтового излучения Вселенной изотропна. Эта скорость называется абсолютной скоростью Солнца.

В следующем разделе мы подробно ознакомимся с движением Земли по орбите вокруг Солнца, а пока используем немного сведений об этом. Случайным образом оказалось, что вектор абсолютной скорости Солнца лежит практически в плоскости земной орбиты. Поэтому зимой орбитальная скорость Земли прибавляется к абсолютной скорости Солнца, а летом вычитается из нее. Следовательно, абсолютные скорости Земли летом и зимой должны отличаться на 60 км/с, а температуры реликтового излучения в направлении к созвездиям Льва и Водолея должны отличаться на 0,54 мК. Сравнение измерений декабря 1980 года и июля 1981 года показало различие температур реликтового излучения, достаточно близкое теории. Тем самым измерены не только абсолютная скорость Земли, но и ее годовые изменения.

Поскольку известна галактическая орбита Солнца, можно найти и скорость абсолютного движения Галактики. Для этого надо вычесть вектор орбитальной скорости Солнца из вектора его абсолютной скорости. Абсолютная скорость Галактики оказывается равной примерно 600 км/с. Направления этих движений показаны на рис. 7.

Примерно такую же величину, около 600 км/с, составляют случайные отклонения скоростей галактик от закона Хаббла. Поэтому существование

абсолютной скорости нашей Галактики не противоречит однородности и изотропии Вселенной, которые справедливы только в сверхгалактических масштабах. Тепловое же излучение Вселенной с учетом нашего дрейфа относительно него изотропно с высокой точностью — отклонения от изотропии лежат в пределах точности эксперимента.

Установление абсолютной скорости Земли имеет и существенную принципиальную сторону. В учебниках

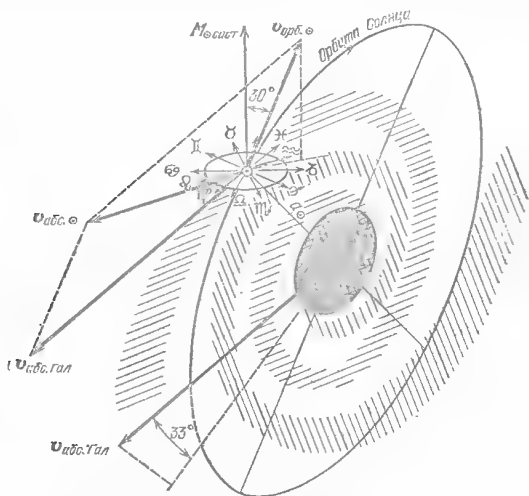


Рис. 7. Схема положения Солнечной системы в Галактике и направления движения Солнца и Галактики относительно реликтового излучения.

физики вы можете прочесть утверждение, что скорость относительна. Не должны ли мы теперь поставить его под сомнение?

Принцип относительности скорости ввел в науку Галилей. Суть его в том, что физические законы одинаковы во всех системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно. Галилей имел в виду, конечно, только механические эксперименты, когда писал в «Диалоге о двух системах, птолемеевой и коперниковой» (1632) об опытах в закрытой каюте под палубой корабля: «Если только движение его равномерно и он не отклоняется ни в ту, ни в другую сто-

ропу, вы не обнаружите ни малейшего изменения во всех указанных явлениях, и ни по одному из них вы не сможете судить, движется ли корабль или стоит на месте».

Принцип Галилея, однако, остался незыблемым и для электромагнитных явлений. Эксперимент Майкельсона 1881 года доказал независимость скорости света от движения системы отсчета, тем самым отвергнув предложенную Лоренцом теорию неподвижного эфира. Под эфиром понималась некая гипотетическая среда, по которой распространяются электромагнитные колебания. Законы электродинамики и принцип Галилея были совмещены Альбертом Эйнштейном, создавшим теорию относительности. Понятие об эфире стало после этого бессодержательным. В память о научных поисках и заблуждениях прошлого наше смещение относительно теплового излучения Вселенной американский астрофизик П. Дж. Е. Пиблс назвал «дрейфом нового эфира». Именно Пиблсу принадлежит идея эксперимента 1979 года.

Заметьте теперь, что измерения абсолютной скорости Земли вовсе не опровергают принцип Галилея. Они ведь проводятся не в закрытой каюте, а во всей видимой части Вселенной. Противоречия между принципом относительности и возможностью измерения абсолютной скорости не возникает еще и потому, что скорость относительно реликтового излучения недостаточна для введения абсолютной системы отсчета пространственных координат. Давайте убедимся в этом.

Зная абсолютную скорость Галактики $v_{\text{абс. Гал}}$, мы можем принципиально указать точку в современной Вселенной, откуда прилетела наша Галактика, точку, где находилось вещество Галактики в момент Большого Взрыва. Направление на нее находится где-то в созвездии Пегаса (конечно, только направление, а не сами звезды созвездия). Рассогласие до этой точки примерно равно $t_0 v_{\text{абс. Гал}} \simeq 2 \cdot 10^{24}$ м. Ясно, однако, что предполагать именно там местонахождение эпицентра Большого Взрыва — бессмысленно.

Представьте себе далекую галактику, скажем, в точке С на рис. 5. Она удаляется от нас со скоростью,

намного превосходящей 600 км/с, но при этом может быть неподвижна относительно реликтового излучения. С тем же самым основанием можно считать, что мир разлетается именно оттуда. Таким образом, во Вселенной нет естественного начала отсчета.

Воздействие на нашу планету реликтового излучения очень мало — источник его далек, а температура низка. Воздействием этим можно было бы и пренебречь, но без рассказа об абсолютной скорости Земли описание ее движений оказалось бы неполным. Вернемся теперь из просторов Вселенной к непосредственным окрестностям планеты, к Солнечной системе.

4. Движение Земли и планет вокруг Солнца

Для дальнейшего изложения орбитальное движение в Галактике и, тем более, дрейф нового эфира будут несущественны. Поэтому начало системы отсчета удобно выбрать в центре масс нашей Солнечной системы. Поскольку на 99,87% эта масса сосредоточена в самом Солнце, то это начало координат практически совпадает с центром Солнца.

Вокруг Солнца обращаются 9 больших планет (Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон) и множество малых небесных тел. Замечательно, что плоскости орбит всех планет, за исключением Плутона, почти совпадают. Плоскость орбиты Земли, естественно, наиболее важна для нас. Как вы уже знаете, эклиптика есть проекция на небесную сферу плоскости земной орбиты. Большинство наблюдаемых событий в Солнечной системе происходит вблизи эклиптики*), «на фоне» созвездий Зодиака. Заметим, что и плоскость обращения Луны вокруг Земли наклонена к эклиптике на угол, меньший 6° , — Луна тоже всегда проектируется на зодиакальные созвездия, видна среди них. Именно поэтому для изучения Солнечной системы наиболее удобно и естественно отсчитывать координаты на небесной сфере от эклиптики.

*) Слово «эклиптика» по-гречески как раз и означает: «линия затмений».

Пять первых, кроме Земли, планет известны человечеству с глубокой древности. Их медленное и загадочное перемещение среди созвездий Зодиака издавна привлекало внимание людей. Этим планетам, Солнцу и Луне, столь разительно отличным от неподвижных звезд, приписывались в древности мистические и магические свойства. Они соотносились с семью днями недели, с известными древним металлами, с мифическими богами. В Древнем Китае, кроме металлов и дней недели, планетам сопоставлялось еще и пять

Таблица 1

Древние соответствия планет

Небесное тело	Астрономический знак	День недели	Металл	Стихия
Луна	☾	понедельник	серебро	—
Меркурий	☿	среда	ртуть	вода
Венера	♀	пятница	медь	металл
Солнце	☉	воскресенье	золото	—
Марс	♂	вторник	железо	огонь
Юпитер	♃	четверг	олово	дерево
Сатурн	♄	суббота	свинец	земля

стихий. И в Древнем Риме дни недели и металлы точно так же соответствовали своим планетам — это до сих пор отражено во многих современных европейских языках. Все эти курьезы сведены в таблице 1. Физического смысла она не имеет, но исторический и познавательный — безусловно. Небесные тела в таблице 1 расставлены в порядке возрастания их периодов обращения по Зодиаку, при этом соответствующие им дни недели следуют через один.

Двенадцати зодиакальным созвездиям соответствуют 12 месяцев года. Слово месяц, очевидно, связано с периодичностью лунных фаз (новолуние, первая четверть, полнолуние, последняя четверть). Именно по новолуниям строились древнейшие календари. В году 12,37 таких лунных месяцев. Отсюда возникло округление этого числа до двенадцати, а уже затем, по-видимому, звезды были разделены по созвездиям. Заметьте, что деление Зодиака именно на 12 созвездий стигмодь не является естественным, соответствующим

звездному небу. Угловые расстояния между звездами соседних созвездий Зодиака в среднем такие же, как и внутри созвездий. В Древнем Китае, кстати, зодиакальных созвездий было 28 — не потому ли, что примерно таково число дней в лунном месяце?

В древнем мире не было известно, что причиной перемещения Солнца в течение года среди созвездий Зодиака является движение Земли. Поэтому традиция, идущая из Древнего Вавилона, соотносит месяцы года тем созвездиям Зодиака, на которые проектировалось Солнце при наблюдении с Земли. Это соотношение, однако, не отвечает нынешнему! С тех пор произошло значительное смещение дат вступления Солнца в последовательные созвездия Зодиака. Мы сравним эти древние и современные даты и рассмотрим это смещение несколько позже. Оно связано с особенностями вращения Земли.

Для понимания реального перемещения Земли в течение года гораздо удобнее следить не за Солнцем, а за направлением вектора, исходящего из начала координат, из Солнца к Земле. В декабре и январе этот радиус-вектор направлен на созвездие Близнецов, в январе — феврале он попадает в созвездие Рака и так далее. Точки, соответствующие этим направлениям в первых числах каждого месяца, отмечены датами на рис. 1.

Так же просто в системе координат с ее началом в Солнце выглядят проекции на звездное небо движения и остальных планет: все они довольно равномерно перемещаются в прямом направлении, слева направо на рис. 1. С точки же зрения земного наблюдателя их траектории по небосводу весьма сложны, их прямое движение время от времени сменяется обратным. Причину этого понял Коперник: причудливость перемещения планет по звездному небу следует из сложения движения планет и движения Земли вокруг Солнца.

До сих пор мы говорили о проекции движения планет на небосвод. Построением кинематических моделей этих движений главным образом и занимались астрономы древности. Исторически следующий шаг состоял в измерении расстояний между планетами и Солнцем, в объяснении планетных орбит,

Гениальный немецкий ученый Иоганн Кеплер (1571—1630) показал, что планеты обращаются по замкнутым кривым, называемым эллипсами. Для дальнейшего нам понадобятся некоторые математические свойства эллипса.

Если разрезать круговой цилиндр наискось или рассматривать окружность под углом, вы увидите эллипс. Его уравнение

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1;$$

a и b — два параметра эллипса, называемые его полуосями (рис. 8). При $a = b$ уравнение эллипса переходит в уравнение окружности радиуса a .

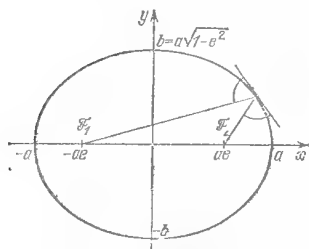


Рис. 8. Эллипс.

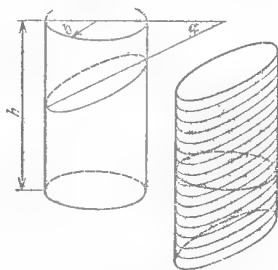


Рис. 9. К выводу площади эллипса.

Удобнее, однако, характеризовать эллипс его большой полуосью a и безразмерным числом $e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$, эксцентриситетом эллипса. Очевидно, $0 \leq e \leq 1$. Случай $e = 0$ отвечает окружности. Чем больше эксцентриситет, тем сильнее вытянут эллипс. При $e = 1$ он вырождается в отрезок длины $2a$.

Внутри эллипса есть две замечательные точки, фокусы эллипса. Они расположены симметрично на большой оси, расстояние между фокусами равно $2ae$. Если из одного фокуса выходит луч, то отразившись от эллипса, он пройдет через другой фокус. И еще одно свойство фокусов: сумма расстояний от любой точки эллипса до его фокусов не зависит от выбора точки и равна $2a$. Эти свойства фокусов эллипса нетрудно доказать, используя его уравнение,

Вычислим площадь эллипса методом, хотя и не очень математически строгим, зато весьма красивым. Представьте себе обычный круговой цилиндр радиуса b и высоты h . Вы знаете его объем $\pi b^2 h$. Разрежем теперь этот цилиндр плоскостью под углом α . Тогда в сечении получится эллипс с полуосями b и $a = b/\cos \alpha$ (рис. 9).

Приставим срезанную верхушку цилиндра снизу. Ясно, что объем составного цилиндра тот же самый. Применим теперь к вычислению этого объема принцип Кавальери: разрежем мысленно цилиндр параллельно новым основаниям на большое число n эллиптических дисков. Объем каждого такого диска есть его площадь — нам пока неизвестная площадь эллипса, — умноженная на высоту диска $h \cos \alpha / n$. Таким образом,

$$\pi b^2 h = n S \frac{h \cos \alpha}{n}.$$

Отсюда, сокращая h и выражая $\cos \alpha$ через a , получим площадь эллипса $S = \pi a b$.

Этот способ нахождения площади эллипса был изобретен в XVII веке японским ученым Такакацу Секи, самостоятельно открывшим принцип Кавальери. К сожалению, контакта между европейской и восточной науками в то время не было.

Анализируя многолетние наблюдения за движением планет, Кеплер вывел три закона, описывающие кинематику движения тел Солнечной системы:

1. Каждая планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

2. При движении постоянна секториальная скорость планеты, т. е. произведение ее скорости на текущее расстояние до Солнца и на половину синуса угла между скоростью и направлением на Солнце.

3. Периоды обращения и большие полуоси орбит связаны соотношением, одинаковым для всех планет:

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{const.}$$

Спустя несколько десятков лет Исаак Ньютон показал, что законы Кеплера однозначно вытекают из динамики движения материального тела, если 1) небесные тела воздействуют друг на друга силой при-

тяжения; 2) направлена она по прямой, соединяющей центры масс; 3) величина этой силы обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами.

Связь этих трех утверждений с законами Кеплера не очевидна. Вы умеете доказывать третий закон Кеплера для круговых орбит. Его доказательство для эллиптических орбит и доказательство первого закона Кеплера, к сожалению, слишком сложны. Примите их на веру. А вот каким образом, используя

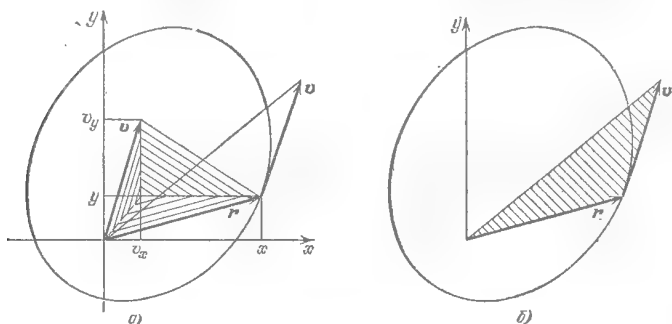


Рис. 10. К выводу постоянства секториальной скорости.

только второе утверждение, центральность силы притяжения, можно доказать второй закон Кеплера.

Секториальная скорость, как нетрудно видеть, есть половина площади параллелограмма, построенного на векторах v и r . Обозначим ее A , она заштрихована на рис. 10. Спроектируем радиус-вектор r и скорость v на оси координат, их проекции будут x , y и v_x , v_y . Вычислим площадь треугольника A , как сумму площадей трех малых треугольников, заштрихованных по-разному:

$$A = \frac{(x - v_x)y}{2} + \frac{(v_y - y)v_x}{2} + \frac{(v_y - y)(x - v_x)}{2} = \frac{xv_y - yv_x}{2}.$$

Посмотрим теперь, как изменится величина A , если время получит малое приращение dt . Из определения понятия скорости следует, что приращения

координат при этом таковы: $dx = v_x dt$ и $dy = v_y dt$. Поэтому

$$dA = \frac{1}{2} (v_x v_y dt + x dv_x - v_y v_x dt - y dv_y) = \\ = \frac{1}{2} (x dv_y - y dv_x).$$

Согласно второму закону Ньютона изменение скорости dv пропорционально силе. Сила же направлена к центру, к началу координат. Поэтому отношение приращений скоростей dv_x/dv_y равно отношению x/y . Отсюда следует, что приращение dA тождественно равно нулю, A постоянно — второй закон Кеплера доказан.

Найдем секториальную скорость Земли. Параметры орбиты Земли вокруг Солнца хорошо известны (таблица 2). За год Земля опишет эллипс, площадь которого $S = \pi ab$. Поэтому секториальную скорость Земли можно найти, разделив эту площадь на период обращения ($\oplus$ — астрономический знак Земли):

$$A = \frac{S}{T_{\oplus}} = \frac{\pi a_{\oplus}^2 \sqrt{1-e^2}}{T_{\oplus}} = 4,46 \cdot 10^{15} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Средняя скорость движения равна удвоенной секториальной скорости, деленной на среднее расстояние до Солнца. Оно, как следует из свойств эллипса, равно большой полуоси. Поэтому

$$\bar{v} = \frac{2A}{a_{\oplus}} = \frac{2\pi a_{\oplus} \sqrt{1-e^2}}{T_{\oplus}} = 29,8 \text{ км/с}.$$

При приближении к Солнцу орбитальная скорость возрастает. Ближайшая к Солнцу точка орбиты называется перигелий — от греческих слов «пери» — «около» и «Гелиос» — «Солнце». Для орбит спутников Земли этот термин заменяется на перигей, от греческого «Гейя» — «Земля». Расстояние от Солнца до перигелия есть $a_{\oplus}(1-e)$. Скорость в перигелии перпендикулярна радиусу-вектору, поэтому найти ее нетрудно:

$$v_{\max} = \frac{2\pi a_{\oplus}}{T_{\oplus}} \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} = 30,3 \text{ км/с}.$$

Самая удаленная от Солнца точка орбиты называется «афелий», расстояние до нее $a_{\oplus}(1+e)$. Из

постоянства секториальной скорости следует, что скорость в афелии равна

$$v_{\min} = \frac{2\pi a_{\oplus}}{T_{\oplus}} \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} = 29,3 \text{ км/с.}$$

Очевидно, в перигелии скорость максимальна, в афелии минимальна.

Теперь посмотрим на орбитальное движение Земли и планет иначе. Не будем следить за их перемещением по орбите, а обратим главное внимание на

Т а б л и ц а 2

Орбиты планет

Планета	a (в $a_{\oplus}$)	Период (годы)	Масса (в $m_{\oplus}$)	Момент (в $M_{\oplus}$)	Наклон орбиты	e
Меркурий	0,39	0,24	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$7^{\circ} 0' 14''$	0,2056
Венера	0,72	0,62	$8,1 \cdot 10^{-1}$	$7,0 \cdot 10^{-1}$	3 23 39	0,0068
Марс	1,52	1,88	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	1 51 0	0,0934
Юпитер	5,20	11,87	$3,2 \cdot 10^2$	$7,6 \cdot 10^2$	1 18 21	0,0484
Сатурн	9,54	29,46	$9,5 \cdot 10^1$	$2,9 \cdot 10^2$	2 29 25	0,0557
Уран	19,18	84,01	$1,5 \cdot 10^1$	$6,4 \cdot 10^1$	0 46 23	0,0472
Нептун	30,06	164,8	$1,7 \cdot 10^1$	$9,5 \cdot 10^1$	1 46 28	0,0086
Плутон	39,44	247,6	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	17 8 38	0,2486

$a_{\oplus} = 1,4959787 \cdot 10^{11} \text{ м; } T_{\oplus} = 3,1558150 \cdot 10^7 \text{ с;}$
 $m_{\oplus} = 5,976 \cdot 10^{24} \text{ кг; } M_{\oplus} = 2,66 \cdot 10^{40} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с; } e_{\oplus} = 0,0167.$

величины, которые сохраняются при движении. Мы знаем, что неизменна плоскость, в которой происходит обращение планеты, и что сохраняется величина A . Эти два утверждения можно объединить. Введем вектор M , равный удвоенному произведению A на массу планеты m и направленный перпендикулярно плоскости обращения в Северное полушарие звездного неба. Этот вектор называется моментом импульса или моментом количества движения. Сохранение его величины эквивалентно второму закону Кеплера, постоянство его направления отражает неизменность плоскости обращения планеты.

Первые два закона Кеплера содержат в себе закон сохранения момента импульса. Но они же утверждают сохранение и еще одного вектора. Заметьте, что эллипс планетной орбиты ориентирован

в пространстве неизменно и эксцентриситет его не меняется. Это означает, что можно ввести другой сохраняющийся вектор, по величине равный эксцентриситету и направленный к перигелию. Будем обозначать его e . Очевидно, что векторы M и e взаимно перпендикулярны.

Момент импульса Земли по его определению перпендикулярен эклиптике, направлен он к точке П — центру звездной схемы на рис. 2. Свой перигелий Земля ежегодно проходит 3 или 4 января; иными словами, вектор e устремлен к созвездию Близнецов. Неточность даты не означает изменения этого направления — это всего лишь свойство нашего календаря.

Законы планетного движения были установлены для Земли и пяти легко наблюдаемых планет. Конечно, они оказались справедливы и для удаленных планет, и для малых тел Солнечной системы. Первую планету, неизвестную древним, открыл в 1781 году английский астроном В. Гершель. Ее называли Уран (обозначается $\Uparrow$ или Υ). В 1801 году итальянец Дж. Пиацци обнаружил первую из малых планет на орбите между Марсом и Юпитером. С тех пор определены орбиты около 2300 малых планет, или астероидов, — многие из них, в отличие от большинства планет, имеют значительные эксцентриситеты и углы наклона к эклиптике. В 1846 году французский ученый У. Леверье и английский Дж. Адамс предсказали по возмущениям орбиты Урана, что должна существовать еще одна планета. В том же году на участке неба, указанном Леверье, ее обнаружил немецкий астроном И. Галле. Это Нептун, его астрономический знак Υ — трезубец бога морей Посейдона — Нептуна. История открытия повторилась и с девятой планетой, Плутонем. Ее авторы — американцы П. Ловелл, вычисливший орбиту предполагаемой планеты, и К. Томбо, обнаруживший Плутон в 1930 году, через 14 лет после смерти Ловелла. Инициалы Ловелла, совпадающие с начальными буквами имени римского бога умерших, и составляют астрономический знак Плутона ♇ . Среднее расстояние до Солнца у Плутона больше, чем у Нептуна, однако с 1980 по 1997 годы Плутон будет находиться ближе к Солнцу, чем Нептун. Это связано с тем,

что в начале 1989 года Плутон пройдет перигелий своей орбиты, имеющей значительный эксцентриситет. Хотя на первый взгляд орбиты Плутона и Нептуна пересекающиеся, столкновения между ними произойти не может — их движение согласовано таким образом, что расстояние между ними никогда не становится меньше, чем 0,6 среднего расстояния от Нептуна до Солнца.

Взгляните теперь на сохраняющиеся характеристики планет. Они сведены в таблицу 2. Под наклоном орбиты в таблице имеется в виду угол наклона плоскости орбиты планеты к эклиптике или, что то же самое, угол между моментом импульса планеты и моментом импульса Земли.

Обратите внимание: углы наклона орбит невелики (наибольший у Плутона, затем у Меркурия), их эксцентриситеты тоже гораздо меньше единицы (и опять исключения — самая удаленная и самая близкая к Солнцу планеты). Эти особенности — источник гипотез об особом происхождении Плутона и Меркурия. Малый по массе Плутон мог быть раньше спутником Нептуна. Меркурий иногда рассматривается как бывший спутник Венеры. Какова на самом деле история этих планет, сказать трудно. Во всяком случае эти события — существенные изменения орбит — происходили очень давно, в начале эволюции Солнечной системы. В настоящее время орбиты планет почти стабильны.

Но что означает слово почти? Ведь только что утверждалось, что законы сохранения момента M и эксцентриситета e — точны. Это не совсем так. Эти законы являются точными, если тел только два, если на планету действует только притяжение звезды. Но в нашей планетной системе много планет и все они притягиваются не только к Солнцу, но и друг к другу.

На наше счастье, масса Солнца настолько превосходит массы планет, что их взаимное притяжение приводит лишь к слабым возмущениям орбит. Без этого обстоятельства Кеплер не открыл бы относительно простых законов, они не дали бы пищу уму Ньютона... А скорее всего, просто не было бы ни того, ни другого — цивилизация вряд ли может существовать в нестабильной планетной системе:

слишком сильны там (мы еще разберемся почему) вариации климата на планетах. Движение уже трех тел сравнимой массы становится очень сложным, непериодическим. Оно может закончиться тем, что самое легкое тело, отобрав энергию у двух других, навсегда покинет систему. Солнечная система устойчива благодаря тому, что в ней только одна звезда, одно тело, существенно превосходящее по массе остальные.

Оценим отношение сил притяжения планет и Солнца. Относительное воздействие на Землю Юпитера, самой массивной из планет, не превосходит величины

$$\frac{F_{J4}}{F_{\odot}} < \frac{m_{J4}}{m_{\odot}} \left(\frac{a_{\oplus}}{a_{J4} - a_{\oplus}} \right)^2 \sim 5 \cdot 10^{-5}.$$

Такого же порядка величины и относительное возмущение орбиты Земли со стороны Венеры (воздействие других планет еще меньше):

$$\frac{F_V}{F_{\odot}} < \frac{m_V}{m_{\odot}} \left(\frac{a_{\oplus}}{a_{\oplus} - a_V} \right)^2 \sim 3 \cdot 10^{-5}.$$

Взаимные возмущения движений планет максимальны в моменты их соединений. Так называются положения, когда планеты оказываются расположенными на одной прямой с Солнцем по одну сторону от него; при этом расстояния между планетами оказываются минимальными. Соединения планет повторяются периодически.

Найдем период соединения планет с периодами обращения T_1 и T_2 . Величина, обратная периоду, есть частота. Обращение всех планет происходит в одну сторону с частотой тем большей, чем ближе планета к Солнцу. Легко понять, что частота соединений равна разности частот обращений планет. Поэтому период соединения T_{12} следует находить по формуле

$$T_{12}^{-1} = |T_1^{-1} - T_2^{-1}|, \text{ или } T_{12} = \frac{T_1 T_2}{|T_2 - T_1|}.$$

Обратите внимание на эту формулу. Она пригодится нам и для вычислений периодов повторяемости разных событий на вращающихся планетах, для понимания устройства нашего календаря.

Теперь мы можем оценить характерные времена, за которые планеты существенно изменяют орбиты друг друга, времена нарушения законов сохранения моментов и эксцентриситетов отдельных планет. После каждого соединения относительное искажение орбиты по порядку величины равно отношению сил притяжения к близкой планете и к Солнцу. Следовательно, характерное время, за которое орбита одной планеты существенно исказится из-за притяжения другой, есть $T_{12}F_{\odot}/F_{пл} \sim T_{12}m_{\odot}(a_2 - a_1)^2/m_2a_1^2$.

Время, через которое орбита Земли исказится под влиянием Юпитера, Венеры и, в меньшей степени,

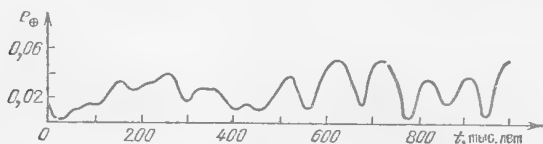


Рис. 11. Изменение эксцентриситета земной орбиты в ближайший миллион лет.

других планет, по этой оценке оказывается порядка 20 тысяч лет. Это, однако, только оценка. Точные же расчеты показывают, что эксцентриситет нашей орбиты меняется непериодически, но с характерным временем, равным ста тысячам лет (рис. 11). Значения эксцентриситета Земли колеблются около величины 0,028. Сейчас этот эксцентриситет меньше среднего и продолжает уменьшаться. Через 25 тысяч лет орбита Земли станет почти круговой. Максимальный же эксцентриситет, которого достигает орбита Земли, равен 0,0658, он почти в четыре раза больше нынешнего. И эта величина на первый взгляд невелика, и при таком эксцентриситете орбита очень похожа на круговую. Однако оказывается, что неравномерность движения Земли по орбите и колебания расстояния до Солнца на протяжении года при больших эксцентриситетах существенно сказываются на тепловом равновесии Земли, на ее климате. Мы вернемся к этому в конце книги.

Моменты импульса планет изменяются при возмущениях с теми же характерными временами, что и эксцентриситеты. Но меняются они не по абсолютной

величине, а только по направлению. Вот как это происходит. Мы уже отмечали, что моменты импульса всех планет почти параллельны. Их направления заключены в небольшом телесном угле вокруг направления полного момента импульса Солнечной системы. Этот момент есть векторная сумма моментов отдельных планет. Он является точно сохраняющимся вектором при всех планетных взаимодействиях. По величине полный момент импульса равен $3,154 \cdot 10^{43}$ кг·м²/с. Это такая же фундаментальная характеристика Солнечной системы, как и ее масса, $1,993 \cdot 10^{30}$ кг. Постоянно и направление полного момента импульса. Этот вектор направлен в созвездие Дракона. На схеме звездного неба, изображенной на рис. 2, точка, куда он направлен, обозначена Π_0 . Орбитальный же момент Земли, перпендикулярный эклиптике, наклонен к моменту импульса Солнечной системы на угол, равный всего $1^\circ,7$. Он направлен тоже в созвездие Дракона, в центр рис. 2, обозначенный буквой Π . Эту точку называют полюсом эклиптики.

Под влиянием взаимных возмущений моменты импульса всех планет медленно поворачиваются вокруг полного момента Солнечной системы. Это явление, поворот плоскостей планетных орбит, называется прецессией. И полюс эклиптики, проекция орбитального момента Земли на небесную сферу, под воздействием тяготения остальных планет за сто тысяч лет опишет маленький кружок радиусом в $1^\circ,7$ вокруг точки Π_0 . Этот кружок и направление прецессии также можно видеть на рис. 2. Честно говоря, траектория полюса эклиптики — не точно окружность, радиус кружка тоже медленно изменяется.

Период в сто тысяч лет может показаться очень большим. Тем не менее, период прецессии мал в сравнении со временем существования Солнечной системы. В это время, превышающее 4 миллиарда лет, укладывается по крайней мере 40 тысяч периодов прецессии. Конечно, нельзя утверждать, что за столь большое число периодов сохраняются углы прецессии, углы наклона планетных орбит. Скорее всего, они уменьшаются, поэтому Солнечная система и стала такой плоской.

Если теперь вы вернетесь к рис. 7, то увидите, что сам момент импульса Солнечной системы, который мы только что считали абсолютно неподвижным, отнюдь не перпендикулярен галактической плоскости. Это, в свою очередь, означает, что он тоже должен очень-очень медленно поворачиваться, прецессировать. Довольно точные астрономические наблюдения ведутся лишь около четырехсот лет, а этого времени недостаточно для того, чтобы можно было определить, как именно происходит этот поворот. Однако характерное время, период этой прецессии, оценить можно. Поскольку Галактика сплюснута довольно сильно, а масса ее сосредоточена не в одном ядре, но распределена по всему диску, период прецессии момента Солнечной системы по порядку величины должен быть близок к периоду оборота Солнца вокруг галактического ядра, т. е. к $2 \cdot 10^8$ лет. И этот период еще заметно меньше времени существования Солнечной системы — Солнце и окружающие его звезды успели совершить от 10 до 30 оборотов вокруг ядра Галактики. Но занять устойчивое положение, близкое к перпендикуляру к плоскости Галактики, момент импульса Солнечной системы еще не успел.

Итак, вот как сложно перемещается в пространстве центр масс Земли и Луны: он движется по эллиптической орбите вокруг Солнца с периодом 1 год; эксцентриситет эллипса меняется с периодом около 10^5 лет, а плоскость эллипса поворачивается около некой средней плоскости; эта средняя плоскость, перпендикулярная моменту импульса всей Солнечной системы, поворачивается с характерным временем $2 \cdot 10^8$ лет. Но Земля, кроме того, еще и вращается. Познакомимся же подробнее с вращением планет.

ПОДВИЖНАЯ ТВЕРДЬ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

1. Кинематика вращения Земли

Представьте себя в роли космического пришельца. Вы приближаетесь к нашей планете из космоса. Перед вами шар, наполовину освещенный Солнцем. Его поверхность частично скрывают белые облака. В просветы между ними через голубоватую дымку атмосферы проглядывают синие океаны и разноцветная поверхность континентов: зеленые леса и поля, желтые пустыни, белые снега.

Космический наблюдатель скоро обнаружит, что облачность планеты перемещается более или менее случайно, а очертания континентов стабильны. По изменению открывающейся картины континентов он легко установит, что земной шар вращается как твердое тело — весь целиком, с одной угловой скоростью. Недолго понаблюдав за Землей и ее спутником, пришелец установит физические постоянные нашей планеты: фигура ее близка к сфере радиуса $R_{\oplus} = 6370$ км, масса Земли $m_{\oplus} = 5,976 \cdot 10^{24}$ кг, угловая скорость вращения $\omega_{\oplus} = 7,292115 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Угловую скорость вращения внешний наблюдатель, естественно, измеряет в системе координат, ориентированной на звезды. Заметьте, что соответствующий период $P_{\oplus} = 2\pi/\omega_{\oplus} = 86\,164,09$ с немного отличается от периода 86 400 с, который земляне называют сутками. К причине этого расхождения мы еще вернемся.

Ось вращения Земли направлена к созвездию Малая Медведица (на звездной схеме рис. 2 недалеко от Полярной звезды отмечена соответствующая точка P). Угол ϵ между осью вращения Земли и направлением на полюс эклиптики Π составляет $23^{\circ}27'$. Будем считать, что космический пришелец выполнил свою задачу. Обратимся к опыту жителей Земли.

Общепринятая система координат на земной поверхности определяется осью вращения. Это хорошо вам известные географические координаты: широта и долгота. Ось вращения пересекает земную поверхность в точках, называемых полюсами, на равном удалении от них проходит окружность нулевой широты — экватор.

Наклон земной оси, как вы знаете, является причиной смены времен года. Посмотрите на рис. 12.

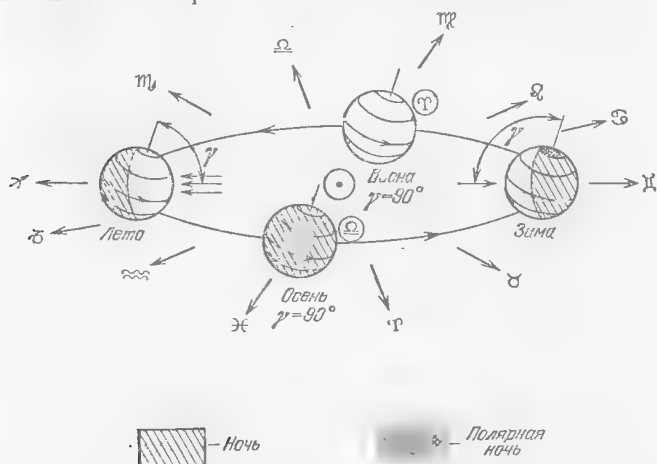


Рис. 12. Времена года. Указаны направления к созвездиям Зодиака.

Зима Северного полушария, декабрь. Радиус-вектор Солнце — Земля устремлен к созвездию Близнецов. Солнце с Земли видно в противоположном созвездии Зодиака, в Стрельце. На часть земной поверхности солнечные лучи не попадают совсем. Там, внутри Северного полярного круга, полярная ночь. А вблизи Южного полюса Солнце не заходит.

При движении Земли по орбите ее ось вращения не меняет своего направления. Области полярной ночи на севере и полярного дня на юге постепенно уменьшаются. 21 марта наступает момент, когда земная ось оказывается перпендикулярной направлению на Солнце. Это день весеннего равноденствия, когда продолжительности дня и ночи равны по всей планете. Солнце находится в созвездии Рыб, а Земля,

если смотреть с Солнца,— в созвездии Девы. Однако на рис. 1 и 12 точка весеннего равноденствия отмечена знаком Υ , знаком Овна. Такова традиция. Две с лишним тысячи лет назад эта точка и была в созвездии Овна. Вскоре мы узнаем, почему она переместилась.

Далее в Северном полушарии наступает лето. 22 июня — день летнего солнцестояния. Происхождение «солнцестояния» связано с тем, что точки восхода и захода Солнца на горизонте и его высота в полдень почти не меняются в течение нескольких дней, близких к летнему и зимнему солнцестояниям. Широты, на которых в эти дни Солнце в полдень стоит в зените, называются тропиками. «Тропос» — по-гречески «поворот». Во время солнцестояний происходит как бы поворот Солнца над тропиками. Северный тропик называют тропиком Рака. Это тоже дань традиции, ведь на самом деле Солнце находится в созвездии Близнецов. Южный же тропик зовут тропиком Козерога, хотя 22 декабря Солнце пребывает в созвездии Стрельца.

Последнюю особую точку своей орбиты, точку осеннего равноденствия, Земля проходит 22 или 23 сентября. Снова ось вращения перпендикулярна солнечным лучам, опять день равен ночи.

Если вы сосчитаете число дней от весеннего равноденствия до осеннего, то, возможно, будете удивлены тем, что получится 186 дней, больше чем полгода. Наоборот, промежуток от осеннего до весеннего равноденствия меньше полугода. Легко понять, что это следствие эллиптичности орбиты Земли. Перигелий Земля проходит зимой, поэтому за лето ей приходится проделать больший путь, а скорость движения ее по орбите меньше, чем зимой.

Закон сохранения момента импульса, как вы помните, приводит к неизменности плоскости орбиты планеты. Следствием этого же закона является и постоянство направления оси вращения Земли. Для отличия от орбитального момента импульса будем называть момент импульса Земли, связанный с ее вращением вокруг оси, моментом вращения Земли. Направлен он, как и ось вращения, к Полярной звезде. Величину же его нам вычислить трудно, поскольку Земля — массивный шар и составляющие его массы

находятся на разных расстояниях от оси вращения. Кроме того, и плотность земных недр растет к центру Земли.

Для точечной массы m , находящейся на расстоянии r от оси вращения, момент импульса равен $m\omega r^2$. Поэтому очень грубо оценить момент вращения Земли можно с помощью выражения

$$M_{\text{вр}} \sim m_{\oplus} \omega_{\oplus} R_{\oplus}^2 \sim 10^{34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}.$$

Сравните его с орбитальным моментом импульса Земли (таблица 2) — он на много порядков меньше.

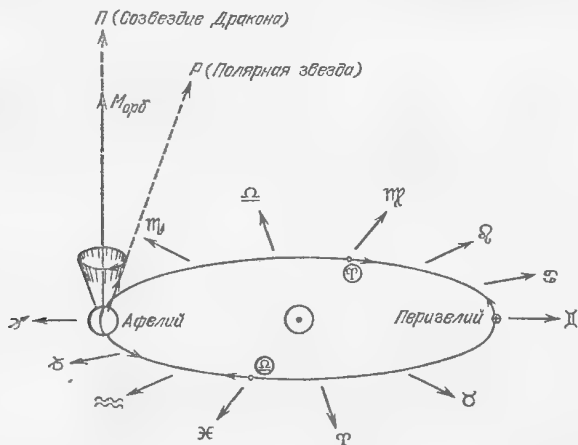


Рис. 13. Прецессия вращения Земли. На орбите указаны точки весеннего γ и осеннего $\ominus$ равноденствий, точка перигелия $\oplus$ и направления их движений.

По этой причине вклады вращений планет можно не учитывать при вычислении полного момента импульса Солнечной системы.

Момент вращения Земли, как и полагается сохраняющейся величине, не изменяется. Но если точнее измерить его направление и сравнить современные результаты с прошлыми, то окажется, что момент вращения Земли все же поворачивается. Почти не меняясь по величине, он медленно вращается вокруг полюса эклиптики, вокруг орбитального момента Земли. Угол его поворота за год составляет всего $20''$, но за 26 тысяч лет момент опишет коническую

поверхность вокруг полюса эклиптики и вернется почти к начальному положению.

С этим физическим явлением мы уже сталкивались — это прецессия. Какие силы вызывают прецессию земной оси, мы узнаем позже, сейчас она интересует нас в кинематическом отношении, в связи с вращением Земли. Итак, период прецессии $T_{\gamma} = 2,578 \cdot 10^4$ лет, ее угловая скорость $\omega_{\gamma} = 2\pi/T_{\gamma} = 7,72 \cdot 10^{-12}$ с⁻¹. С такой скоростью пе-

ремещается по эклиптике точка весеннего равноденствия γ . Равноденствия наступают чуть раньше, чем Земля сделает по орбите полный оборот относительно звезд. Поэтому это явление еще называют предварением равноденствий, да и само слово прецессия происходит от латинского *praecedo*, что означает «иду вперед, предшествую».

Открыл прецессию земной оси великий астроном Древней Греции Гиппарх. В III веке до нашей эры греческие астрономы провели перепись звезд, составили первый звездный каталог. Через 150 лет после этого Гиппарх обнаружил, что положения всех звезд сместились относительно точки весеннего равноденствия. Это означает, что равноденствие наступает чуть раньше, чем проходит звездный год.

Наш календарь устроен таким образом, чтобы день весеннего равноденствия приходился ежегодно на одну и ту же дату, 21 марта. Это обстоятельство позволит нам вычислить, когда начали обозначать точку весеннего равноденствия знаком Овна, когда получили свои названия тропики Рака и Козерога. Дело в том, что кроме этих традиционных терминов, осталось еще довольно широко распространенное соответствие знаков Зодиака месяцам и датам. В эти даты Солнце проходило границы созвездий в глубокой древности. Давайте сравним даты прохождения Солнцем созвездий в древности и теперь: см. таблицу 3.

Из этого расписания видно, что в древности, действительно, созвездие Рака соответствовало летнему солнцестоянию, а созвездие Козерога — зимнему, так что названия тропиков были совершенно оправданы. В настоящее время это древнее соответствие месяцев созвездиям не имеет реального смысла. Но зна-

ки Зодиака изредка употребляются для обозначения моментов весеннего и осеннего равноденствий, а древнее расписание дат, как и тысячелетия назад, используется астрологами для составления гороскопов.

Вот для чего, однако, можно всерьез использовать древнее соответствие дат и созвездий Зодиака — для того, чтобы установить, когда оно было вве-

Таблица 3

Древние и современные даты прохождения созвездий Солнцем

Созвездие	Древние даты	Современные даты
Водолей 	20.I — 18.II	21.II — 18.III
Рыбы 	19.II — 20.III	19.III — 21.IV
Овен 	21.III — 19.IV	22.IV — 21.V
Телец 	20.IV — 20.V	22.V — 21.VI
Близнецы 	21.V — 21.VI	22.VI — 22.VII
Рак 	22.VI — 22.VII	23.VII — 23.VIII
Лев 	23.VII — 22.VIII	24.VIII — 23.IX
Дева 	23.VIII — 22.IX	24.IX — 24.X
Весы 	23.IX — 22.X	25.X — 23.XI
Скорпион 	23.X — 21.XI	24.XI — 23.XII
Стрелец 	22.XI — 21.XII	24.XII — 22.I
Козерог 	22.XII — 19.I	23.I — 20.II

дено. Нам известно, с какой скоростью перемещается точка весеннего равноденствия. В древности 21 марта Солнце вступало в созвездие Овна, а сейчас в этот день оно находится в созвездии Рыб. Расстояние между старым и новым положениями точки равноденствия Солнце проходит за 32 дня. Период прецессии примерно равен 26 000 лет; за это время точка равноденствия совершает полный оборот по эклиптике, смещается на 365 дней. Поэтому смещение на 32 дня происходит за

$$26000 \frac{32}{365} = 2280 \text{ лет.}$$

Это означает, что древнее соответствие дат зодиакальным созвездиям было точным примерно в 300 году до нашей эры.

В 331 году до нашей эры войска Александра Македонского вошли в Вавилон. В походе Александра

сопровождали многие греческие ученые. Вавилонские жрецы, халдеи, в это время обладали астрономическими знаниями, намного превосходившими по своей точности греческие. Греки позаимствовали в Вавилоне систему мер, связанную с астрономическими наблюдениями: деление суток на 24 часа (по два часа на каждое созвездие Зодиака), деление окружности на 360 градусов (Солнце проходит по эклиптике примерно 1° в сутки), деление часа на 60 минут, минуты на 60 секунд, деление градуса на угловые минуты и секунды. Неудивительно и то, что около 300 года до нашей эры греки создали солнечный календарь, используя астрономические знания халдеев. В этом календаре месяцы года однозначно соответствовали созвездиям Зодиака, и в день весеннего равноденствия Солнце действительно находилось в созвездии Овна.

Нетрудно вычислить и время, когда положение Солнца в день весеннего равноденствия, благодаря прецессии, переместилось в созвездие Рыб, когда Рыбы стали в этом смысле главным созвездием Зодиака. Надо, однако, иметь в виду, что границы между созвездиями в древности не проводились с такой точностью, как теперь. Поэтому достаточно оценить момент перехода с точностью до века: получится I век до нашей эры. Это событие, конечно, не было реальным астрономическим явлением, ведь границы между созвездиями условны. Тем не менее, оно не прошло незамеченным народами древности, придававшими большое значение положениям небесных светил. Есть мнение, что именно с ним связан мистический подъем, давший толчок возникновению христианства. Известно, например, что религиозным символом ранних христиан был не крест, а изображение рыбы.

Следующим после Рыб созвездием Зодиака, где окажется Солнце в день весеннего равноденствия, будет созвездие Водолея. Этот переход произойдет примерно в 2600 году.

2. Физические основы календаря

Прецессия оси вращения Земли — процесс медленный, на протяжении жизни одного поколения ею можно и пренебречь. Она, однако, при-

носит неприятности астрономам. Они измеряют координаты звезд от точки весеннего равноденствия, поэтому в долготу звезд приходится вносить растущую со временем поправку, ту самую, которую впервые измерил Гиппарх. Прецессию необходимо учитывать и при составлении календаря, он ведь должен быть рассчитан не на одно поколение.

Для нас, жителей Земли, наиболее важные периодические события — это смена дня и ночи и смена времен года. Наша обыденная жизнь тесно связана с Солнцем. С временами года изменяется погода на планете, с ними связаны сельскохозяйственные работы. Поэтому календарь, построенный на периодичности этих явлений, нам наиболее удобен. Но создать его было не просто.

Выпишем еще раз с нужной точностью исходные физические данные, необходимые для построения солнечного календаря:

$$\text{звездный год } T_{\oplus} = 3,155815014 \cdot 10^7 \text{ с;}$$

$$\text{звездные сутки } P_{\oplus} = 8,616409 \cdot 10^4 \text{ с;}$$

$$\begin{aligned} \text{период прецессии } T_{\gamma} &= 25780 \cdot 3,156 \cdot 10^7 \text{ с} = \\ &= 8,135 \cdot 10^{11} \text{ с.} \end{aligned}$$

Определим сперва, какова продолжительность времени между двумя последовательными весенними равноденствиями. Этот период называется тропическим годом. Его и надо положить в основу календаря, тогда и равноденствия, и все времена года будут приходить на одни и те же даты.

Точка равноденствия на небесной сфере определяется моментом, когда направление Солнце — Земля перпендикулярно земной оси. Эта точка перемещается по эклипке в направлении, противоположном движению Земли, с периодом прецессии T_{γ} . На примере вычисления периодов соединений планет мы убедились, что частота соединений равна разности частот обращения. Похожие рассуждения дают возможность вычислить и период между равноденствиями. Но планеты обращаются в одном направлении, а точка равноденствия смещается навстречу движению Земли. Поэтому для нахождения обратного тропического года частоты — обратные периоды этих движений —

следует сложить:

$$T_{\text{троп}}^{-1} = T_{\oplus}^{-1} + T_{\gamma}^{-1}; \quad T_{\text{троп}} = \frac{T_{\oplus} T_{\gamma}}{T_{\oplus} + T_{\gamma}} = 31\,556\,926 \text{ с.}$$

Тропический год на 1224 секунды или на двадцать с половиной минут короче звездного года — истинного периода обращения Земли.

Только что использованная формула, по сути дела, дает величину периода кругового движения в системе координат, вращающейся с другим известным периодом. Она же пригодна и для вычисления солнечных суток. Поскольку земная орбита имеет форму эллипса, Солнце перемещается по эклиптике неравномерно в течение года. В связи с этим несколько меняется и угловая скорость, с которой Солнце движется по небосводу. Для составления календаря нужно найти средние за год солнечные сутки P_0 . Иными словами, нужно найти период вращения Земли в системе координат, где вектор Солнце — Земля в среднем за год не вращается. Поскольку вращение и обращение Земли происходит в одном направлении, то средняя частота появления Солнца P_0^{-1} есть разность частот: частоты вращения Земли $P_{\oplus}^{-1}$ и частоты наступления равнодействия $T_{\text{троп}}^{-1}$. В результате получаем:

$$P_0^{-1} = P_{\oplus}^{-1} - T_{\text{троп}}^{-1}; \quad P_0 = \frac{P_{\oplus} T_{\text{троп}}}{T_{\text{троп}} - P_{\oplus}} = 86\,400,000 \text{ с.}$$

Вот и возникло привычное нам число секунд в сутках: $86\,400 = 24 \cdot 60 \cdot 60$. Именно отсюда и определялась раньше секунда — как $1/86\,400$ часть средних солнечных суток. Однако в 60-х годах были созданы атомные часы, точность хода которых выше, чем стабильность вращения Земли. Поэтому эталон времени был изменен, секунда теперь определяется по частоте колебаний атома цезия. Заодно появилась возможность измерять очень малые возмущения угловой скорости вращения Земли и очень малое замедление ее вращения.

Теперь давайте вычислим, сколько солнечных суток приходится на тропический год:

$$K = \frac{T_{\text{троп}}}{P_0} = 365,2422 \dots$$

Первые три цифры этого числа всем хорошо знакомы, это число дней в году. Округлив дробную добавку до $0,25 = 1/4$, легко понять причину появления високосного года: раз в четыре года нужно добавить лишний день (29 февраля), для того чтобы дата наступления равноденствия оставалась 21 марта.

Однако расхождение K и его приближения $365,25$ еще достаточно велико. Смещение равноденствия на один день при таком календаре произойдет через $(K - 365,25)^{-1} = 128$ лет. Поэтому в принятом нами календаре на каждые 400 лет приходится не 100, а только 97 високосных лет. В частности, 1600 год был високосный, 1700, 1800 и 1900 — не високосные, 2000 год снова будет високосным и так далее.

Приближение $365 + \frac{1}{4} - \frac{3}{400} = 365,2425$ тоже не точно совпадает с K . Однако вычислить, через какое время дата весеннего равноденствия сместится на один день, уже не так просто. Дело в том, что само число K не строго постоянно. Из-за замедления вращения Земли оно очень медленно, каждый год всего на $6 \cdot 10^{-8}$ уменьшается. Во всяком случае, ближайшие 1000 лет можно спокойно пользоваться современным календарем, не вводя никаких поправок в счет дней. Весеннее равноденствие останется 21 марта.

3. Вращение Луны и планет

Все известные нам планеты, все их спутники вращаются. Есть некая закономерность во вращении планет: чем больше масса планеты, тем быстрее она вращается. Это не строгий и не доказанный закон, из этого правила есть исключения, но в целом — посмотрите на рис. 14 — создается впечатление, что закономерность эта реальна.

Ее разгадка, по-видимому, скрыта в истории образования Солнечной системы. По современным представлениям Солнце и планеты образовались из вращающейся туманности, состоящей из газа и твердых пылевых частиц. При столкновениях частицы укрупнялись, образуя зародыши планет и Солнца. Наибольшее число столкновений происходило в центре масс системы, туда же собрался и почти весь газ туманности. Так образовалось Солнце. Однако почти весь

начальный момент импульса туманности оказался сосредоточенным не в Солнце, а в планетах. После того как Солнце зажглось (как оно горит, рассказано в гл. III), под воздействием его излучения легкие газы из ближайшей окрестности Солнца были рассеяны на периферию. Там из них образовались планеты-гиганты.

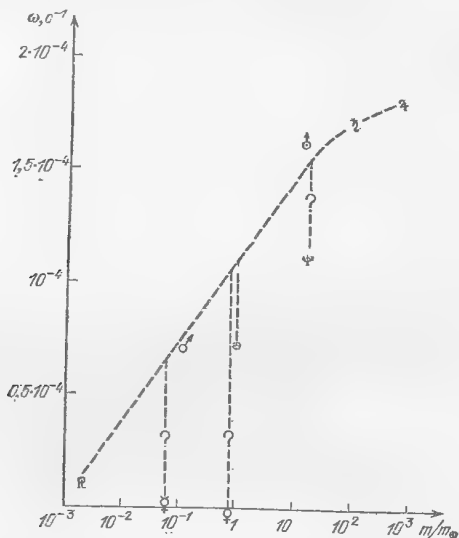


Рис. 14. Зависимость угловой скорости вращения от масс планет. Соответствующие точки изображены знаками планет, прямые с вопросительными знаками — возможное замедление вращения.

Планеты же земной группы оказались составленными в основном из вещества твердых частиц.

При сжатии вещества вращающейся туманности в плотные шары планет скорость вращения возрастает — это следствие закона сохранения момента импульса. Поэтому неудивительно, что у планет-гигантов и скорость вращения оказалась больше, чем у меньших по размерам планет.

Интересно проследить за отклонениями от этой закономерности — линии рис. 14, соединяющей большинство планет. Давайте допустим, что при образовании Солнечной системы подобная закономерность осуществлялась для всех планет, но потом по разным причинам некоторые из них замедлили свое вращение. На рис. 14 эта возможная эволюция вращения

показана штриховыми прямыми с вопросительными знаками.

Нептун далек от нас, и наших знаний о нем пока недостаточно для серьезной дискуссии, «правильно» ли он вращается. Вспомните все же о предположении, что Плутон был раньше его спутником. Может быть, Нептун частично утерять момент вращения при отрыве от него Плутона?

Нам известна и причина замедления вращения Земли, и современная величина этого замедления. Землю тормозит ее спутник, Луна. Как это происходит, мы подробно расскажем позднее. В начале эволюции Солнечной системы замедление это было, по-видимому, обоюдным — не только Луна тормозила вращение Земли, но и Земля мешала быстрому вращению своего спутника. В результате этого сейчас Луна все время повернута к нам одной своей стороной.

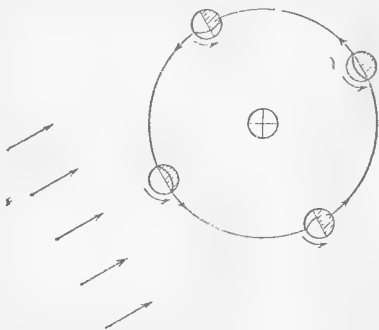


Рис. 15. Вращение Луны и изменение ее фаз. Серпом отмечена сторона Луны, обращенная к Земле, штриховкой — геновая сторона Луны.

Из этого не следует, что Луна не вращается относительно звезд. Но звездный период ее вращения в точности равен периоду обращения Луны вокруг Земли: $P_{\text{з}} = T_{\text{з}} = 27,322$ сут. Кинематику вращения Луны легко понять из рис. 15.

Если отношения частот колебаний или частот вращений кратны отношению целых чисел, то говорят, что эти частоты находятся в резонансе. Происходит это слово от латинского *resonare*, что означает «повторять звук». Важность этого физического явления в том, что при резонансе обязательно происходит взаимодействие тел, причем такое взаимодействие, которое поддерживает кратность частот, делает резонанс устойчивым. Вращение Луны резонансно ее обращению. Но в Солнечной системе не только Луна вращается резонансно!

Причина аномально медленного вращения Меркурия и Венеры неясна. Возможно, и в этом случае объяснение следует искать, развивая гипотезу о том, что в прошлом они обращались вокруг Солнца совместно,

по одной орбите. Интересно, однако, что сейчас и та, и другая планета участвуют в резонансном вращении. Но резонанс у них не друг с другом.

Период вращения Меркурия был измерен не так давно методами радиоастрономии. Оказалось, что он в точности равен двум третям периода обращения этой планеты. Такой резонанс приводит к очень интересной кинематике движения Меркурия. Посмотрите на рис. 16. У эллипса орбиты Меркурия значительный эксцентриситет, поэтому Солнце, расположенное в фокусе эллипса, заметно смещено от центра. Скорость перемещения Меркурия по орбите весьма неравномерна: в перигелии она в 1,52 раза больше, чем в афелии.

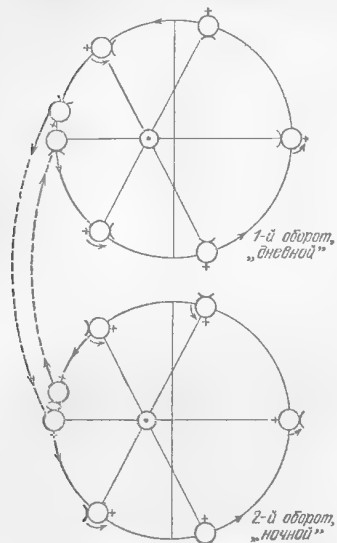


Рис. 16. Вращение и обращение Меркурия: изображены два последовательных оборота вокруг Солнца, «дневной» и «ночной» по отношению к стороне Меркурия, отмеченной «рожками» его астрономического знака.

Период обращения Меркурия $T_{\text{М}}$ равен 88 земным суткам, период его вращения $P_{\text{М}} = 2T_{\text{М}}/3 = 58,7$ сут. Используем формулу для солнечных суток и найдем $P_{0\text{М}}$ — период между двумя восходами Солнца на Меркурии:

$$P_{0\text{М}}^{-1} = P_{\text{М}}^{-1} - T_{\text{М}}^{-1} = \frac{1}{2} T_{\text{М}}^{-1}; \quad P_{0\text{М}} = 2T_{\text{М}} = 176 \text{ сут.}$$

Получается, что солнечные сутки Меркурия втрое больше звездных и вдвое больше периода его обращения. Поэтому на рис. 16 и пришлось нарисовать орби-

ту Меркурия два раза — для дневного оборота и для ночного. Рожки и крестик-хвост астрономического знака нарисованы, чтобы было удобнее следить за его вращением. Заметьте, что в перигелии Меркурий повернут к Солнцу боками, то одним, то другим, а в афелии — то рогами, то хвостом.

Вращение Венеры еще более медленное. Но происходит оно в обратном направлении! Все планеты движутся в одну сторону вокруг Солнца, большинство планет и их спутников вращается в том же направлении. Это означает, что момент их вращения по направлению близок к орбитальному моменту импульса. Исключения: Венера и Уран. Ось вращения Урана почти перпендикулярна его орбитальному моменту импульса, лежит почти в плоскости эклиптики. Ось вращения Венеры почти перпендикулярна плоскости ее орбиты, но направление ее вращения противоположно. Припишем поэтому знак минус величине ее периода вращения: $P_{\varphi} = -243,16$ сут.

Резонанс вращения Венеры оказался связанным с орбитальным движением Земли. Период вращения Венеры (P_{φ}), период ее обращения ($T_{\oplus}^{\varphi}$) и период обращения Земли связаны между собой следующим точным равенством:

$$P_{\varphi}^{-1} = -4T_{\oplus}^{-1} + 5T_{\oplus}^{-1}.$$

Чтобы понять кинематику движения Венеры, вычислим период соединений Венеры и Земли:

$$T_c^{-1} = T_{\varphi}^{-1} - T_{\oplus}^{-1}; \quad T_c = \frac{T_{\varphi} T_{\oplus}}{T_{\oplus} - T_{\varphi}} = 583,92 \text{ сут.}$$

С таким периодом происходит сближение этих планет на минимальное расстояние. Перейдем теперь к вращающейся системе отсчета, в которой Земля неподвижна. Тогда T_c окажется временем, за которое Венера возвращается к Земле, сделав лишний оборот вокруг Солнца. Нетрудно видеть, что за период соединений, за эти 583,92 наших земных суток, на Венере пройдет ровно 5 солнечных суток — 5 раз взойдет Солнце над горизонтом Венеры. И ровно 4 раза

наблюдатель на Венере увидел бы восход Земли, если бы ее атмосфера была прозрачна:

$$\frac{T_c}{5} = (T_{\oplus}^{-1} - P_{\oplus}^{-1})^{-1} =$$

$$= 116,8 \text{ сут} — \text{солнечные сутки Венеры};$$

$$\frac{T_c}{4} = (T_{\oplus}^{-1} - P_{\oplus}^{-1})^{-1} =$$

$$= 146,0 \text{ сут} — \text{«земные» сутки Венеры}.$$

В моменты соединений, когда Венера ближе всего к Земле, она всегда обращена к нам одним и тем же участком своей поверхности. На рис. 17 это место отмечено крестиком астрономического знака Венеры.

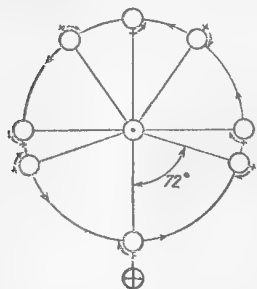


Рис. 17. Вращение Венеры и ее обращение вокруг Солнца в системе координат неподвижной Земли. В моменты соединения Венера всегда обращена к Земле стороной, отмеченной крестиком ее астрономического знака.

Таким образом, планеты, выпадающие из закономерности рис. 14, имеют свои, исключительные особенности вращения. Это и позволяет думать, что правило «большой планеты — быстрое вращение» не случайно.

Отметим еще серьезное отличие вращения планет земной группы от вращения планет-гигантов. Меркурий, Венера, Земля и Марс вращаются как единое целое, как твердое тело. Скорость вращения планет-гигантов неоднородна. Она за-

метно зависит и от широты, и, по-видимому, от глубины. (Приведенные на рис. 14 угловые скорости вычислены по периодам вращения экваториальных областей.) Это говорит о том, что планеты-гиганты не твердые тела.

До сих пор обсуждалась только кинематика вращения планет и не рассматривались внутренние силы в них, порождаемые вращением и гравитацией. Обратимся же теперь к внутренней динамике планет.

4. Фигуры небесных тел

Перефразируя Льва Толстого, можно сказать: все планеты и их большие спутники похожи друг на друга, все астерониды и малые спутники бесформенны по-своему. Фигура Солнца и планет — сфера, немного сплюснутая вращением. Причина этого в том, что шар — устойчивая конфигурация тяжелого тела. Но где проходит граница между малыми и большими небесными телами? Начиная с какой массы, начиная с какого размера они приобретают сферическую форму?

Небесные тела становятся сферическими под действием собственной тяжести. Твердое вещество небольшого астероида может сохранять произвольную форму. Но если масса его превзойдет некий предел, то ускорение свободного падения на его поверхности станет настолько велико, что камень не выдержит нагрузки собственного веса — выступающие части астероида обвалятся, приближая его форму к сферической. Попробуем оценить массу и размер небесного тела, еще способного принимать произвольную форму.

Пусть масса небесного тела m , а средняя плотность его ρ . Тогда объем тела равен m/ρ , поэтому размеры тела близки к $R \sim (m/\rho)^{1/3}$. Наша цель — не точный результат, а оценка. Для оценки не важны численные коэффициенты, не слишком сильно отличающиеся от единицы. Поэтому будем считать R характерным размером тела, не заботясь пока о его форме.

Ускорение свободного падения на поверхности небесного тела можно оценить, как $g \sim Gm/R^2 \sim \sim Gm^{1/3}\rho^{2/3}$. Направлено оно примерно к центру масс тела. Оценим теперь давление, которое создается в центральной его части под действием собственного веса. Как вы знаете, давление, создаваемое однородным столбом высоты R в поле тяжести g есть $p = \rho g R$. В нашем случае ускорение меняется вдоль радиуса, и эта формула не является точной, но для оценки ее использовать можно. Итак, внутри небесного тела давление по порядку величины равно

$$p \sim \rho g R \sim Gm^{2/3}\rho^{4/3}.$$

Давление, сжимающее вещество со всех сторон, не разрушает материал. Однако, если форма тела

неправильная, не сферическая, то под действием тяжести в нем возникают еще и сдвиговые напряжения. Напряжение — это физический термин, описывающий распределение внутренних сил в материале. Давление — тоже напряжение, но такое, при котором силы, приложенные к каждой точке тела, воздействуют на нее со всех сторон одинаково, изотропно. Кроме давления — напряжения всестороннего сжатия (рис. 18, а) — возможно еще напряжение сдвига. Оно возникает в ситуации, когда силы действуют так, как показано на рисунке 18, б, в.

В жидкости и газе под действием сдвиговых напряжений возникают течения. Поэтому для неподвижных

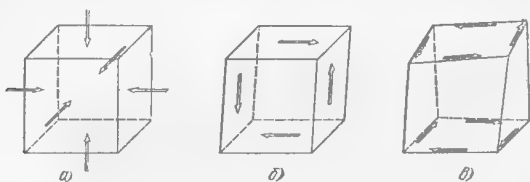


Рис. 18. Напряжения в твердом теле: а) давление или всестороннее сжатие; б) сдвиг и давление; в) чистый сдвиг или кручение.

газов и жидкостей справедлив известный вам закон Паскаля — напряжения в них изотропны. Твердые тела упруго противодействуют напряжению сдвига. По этой причине и возможно существование произвольной формы твердых тел, и не только небесных — почти во всяком твердом теле существуют сдвиговые напряжения. Если форма небесного тела отличается от сферы, то сдвиговые напряжения в нем того же порядка величины, что и давление: $\sigma \sim p \sim Gm^{2/3}\rho^{4/3}$.

Твердые тела упруго противодействуют напряжению сдвига, но до известного для каждого вещества предела. Этот предел есть или предел разрушения для хрупких тел — они трескаются, крошатся, — или предел текучести для пластичных материалов. Так или иначе, предел прочности существует для всех твердых тел; обозначим его σ_m . При сдвиговых напряжениях, превосходящих σ_m , твердое тело необратимо меняет свою форму.

Поэтому условие $\sigma \sim \sigma_m$ дает оценку той критической массы $m_{кр}$ и того критического размера, $R_{кр}$, вы-

ше которых небесные тела могут иметь только форму, близкую к сферической. Вот формулы для критической массы и критического размера:

$$m_{\text{кр}} \sim \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\sigma_m}{G} \right)^{3/2}; \quad R_{\text{кр}} \sim \frac{1}{\rho} \left(\frac{\sigma_m}{G} \right)^{1/2}.$$

Оценки для некоторых космических и земных материалов приведены в таблице 4.

Размеры всех планет Солнечной системы намного больше критических и все они, действительно, сферичны. А вот спутник Марса, Фобос, похож на картофелину с размерами 14 км × 11,5 км × 10 км — его

Таблица 4

Максимальные массы и размеры бесформенных твердых небесных тел

	Лед	Лунная порода	Гранит	Железо
Плотность (10^3 кг/м^3)	1,0	2,5	2,7	7,8
Предел прочности (Н/м^2)	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^7$	10^8	10^9
Масса $m_{\text{кр}}$ (кг)	10^{19}	$3 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{20}$	10^{21}
Размер $R_{\text{кр}}$ (км)	200	300	500	500

размеры меньше критических. И Амальтея, спутник Юпитера, в длину имеет 265 км, а в поперечнике всего 150 км. Еще один пример тела, с размерами, близкими к критическим, дает Мимас, спутник Сатурна. Это шар диаметром 390 км с массой $3 \cdot 10^{19}$ кг, со средней плотностью, близкой к плотности водяного льда. Но его сферическая поверхность искажена глубоким кратером диаметра 130 км, — по-видимому, следом падения другого небесного тела.

Ясно, что на небесных телах с размерами, чуть большими критических, высота гор может быть сравнима с их радиусом. А какова предельная высота гор на больших твердых планетах?

Внутри крутой горы тоже возникают значительные сдвиговые напряжения. Если, допустим, гора плотности ρ представляет собой конус высоты h , то среднее давление на ее основание равно $p = \rho gh/3$. При крутизне, большей 45° , сдвиговое напряжение в отдельных участках недр горы достигает давления p . Опять приравнивая его пределу прочности σ_m , получим

формулу для оценки максимальной высоты гор на планетах:

$$h_{\max} \sim \frac{3\sigma_m}{\rho g}.$$

Для гранитных гор Земли эта оценка дает предельную высоту 11 км. Считая такими же характеристики горных пород и на других планетах, получим, что на Венере не может быть гор, выше 13 км, на Марсе — выше 30 км, на Меркурии — выше 30 км.

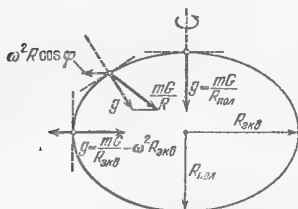


Рис. 19. Равновесная фигура вращающейся планеты. Нормаль к поверхности направлена вдоль векторной суммы гравитационного и центробежного ускорений.

А вот фактические данные об известных высших точках планет: Земля — гора Эверест — 9 км; Венера — вулкан Максвелл — 12 км; Марс — вулканы Арсия и Олимп — 27 и 24 км.

Отклонения поверхности от средней, как видите, зависят, главным образом, от ускорения свободного падения

на планетах, и по сравнению с их радиусом высота гор мала. Поэтому фигуры не только планет-гигантов, но и твердых планет земной группы близки к своему устойчивому, равновесному состоянию. Посмотрим теперь, как влияет на фигуры планет вращение.

Если планета размера R , большего критического, вращается, то ее равновесная форма не точная сфера, а сфера, приплюснутая у полюсов. Экваториальный радиус $R_{\text{экв}}$ вращающейся планеты больше, чем расстояние от центра до полюса $R_{\text{пол}}$. Глядя на рис. 19, нетрудно понять, что устойчивая фигура планеты обладает таким свойством, что ее поверхность в любой точке перпендикулярна векторной сумме гравитационного и центростремительного ускорений. Отношение их величин $\omega^2 R/g = \omega^2 R^3/mG$ и есть основной параметр, от которого зависит фигура вращающейся планеты. Оказывается, сжатие планеты — относительное отклонение ее поверхности от сферы — близко к отношению ускорений:

$$\frac{R_{\text{экв}} - R_{\text{пол}}}{R_{\text{экв}}} \simeq \frac{\omega^2 R^3}{mG}.$$

Проверим это утверждение с помощью таблицы 5. Видно, что эта примитивная формула дает неплохое согласие оценок с истинными сжатиями планет.

Точная же теория равновесия жидкой сферы дает для Земли сжатие $1/299,67$, а фактическое ее сжатие (с той же точностью) равно $1/298,26$. Оно больше вычисленного и, значит, соответствует большей скорости вращения Земли: $1,002\omega_{\Phi}$. Мы увидим, что с такой

Таблица 5

Периоды вращения и сжатие планет

	R (м)	P (с)	$\frac{\omega^2 R^3}{mG}$	$\frac{R_{\text{экр}} - R_{\text{пол}}}{R_{\text{экр}}}$
Земля	$6,37 \cdot 10^6$	86 164	$1/289$	$1/298$
Марс	$3,39 \cdot 10^6$	88 643	$1/220$	$1/190$
Юпитер	$7,14 \cdot 10^7$	35 430	$1/11$	$1/15$
Сатурн	$6,03 \cdot 10^7$	36 840	$1/6$	$1/9,5$

скоростью Земля вращалась примерно 10 миллионов лет назад. За такое время земные породы «перетекают» в новое равновесное состояние. С такой задержкой фигура Земли подстраивается под ее вращение.

Итак, форма земной поверхности близка к равновесной. Поэтому представляется удивительным четкое разделение земной поверхности на континентальную и океаническую. Континенты возвышаются над дном океана на 4—5 километров. Такое возвышение в виде отдельной горы не вызывает удивления, но площадь континентов огромна — 30% всей земной поверхности. Правда, океанические впадины заполнены водой. Плотность ее, однако, в 2—3 раза меньше плотности горных пород — вода не может компенсировать давление их пятикилометровой толщи. Почему же континенты не тонут? Ведь земные породы достаточно податливы. Казалось бы, рано или поздно земная поверхность должна сделаться более ровной. Этого почему-то не происходит. Как же можно это объяснить?

Оказывается, континенты действительно плавают. Земная кора сложена, в основном, из двух пород: базальтов и гранитов. Они покрыты менее плотным слоем осадочных пород. Плотность базальтов при

одинаковом давлении и температуре выше, чем плотность гранитов. Посмотрите теперь на рис 20 — примерно так распределены граниты, базальты, осадочные породы и океанская вода в экваториальном сечении Земли. Пятикилометровая континентальная толща плавает на гранитных «подушках» толщиной 15—20 километров. Под гранитом и базальтом лежит

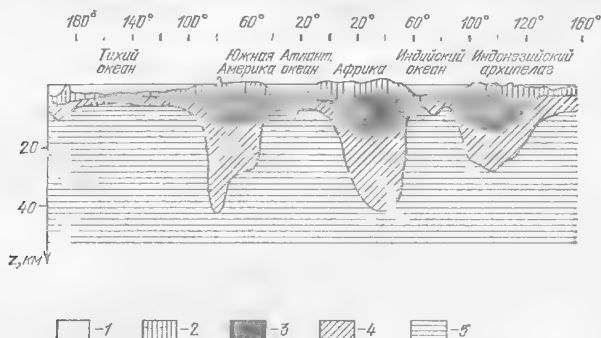


Рис. 20. Схема строения земной коры в экваториальном разрезе.

мантия Земли, состоящая из еще более плотных пород. Состав ее точно не известен — до таких глубин пробурить земную кору пока не удалось.

Континенты плавают, но только в гидростатическом смысле. Они и на самом деле перемещаются друг относительно друга вместе с прилегающими к ним участками океанической коры. Континенты изменяют свое взаимное положение со скоростью порядка нескольких сантиметров в год. Повторение береговой линии Африки и Южной Америки, бросающееся в глаза при взгляде на глобус, неслучайно: около 200 миллионов лет назад эти континенты составляли один. Совпадает и геологическое строение противоположных берегов расширяющегося промежутка между ними — Атлантического океана.

Австралия около 100 миллионов лет назад составляла единое целое с Антарктидой. Центр этого праматерика находился, однако, не около Южного полюса, а примерно на 60° южной широты. Кости предков сумчатых животных, ныне обитающих только в Австралии, недавно были найдены и в Антарктиде,

Гипотеза дрейфа континентов была развита еще в 1912 году немецким геофизиком Вегенером. Затем долгие годы эта гипотеза считалась несостоятельной. Возродилась она вновь только в 60-х годах уже как теория, подкрепленная разнообразными сведениями о строении океанического дна. Эта теория называется новой глобальной тектоникой, или тектоникой плит. Основное ее положение состоит в том, что движутся не сами континенты, а плиты — большие участки земной коры, включающие в себя и континенты, и соседние участки океанического дна. Главных плит шесть: Евроазиатская, Африканская, Антарктическая, Индо-австралийская, Американская и Тихоокеанская. Между ними находятся несколько более мелких плит, движущихся отчасти независимо.

На одних границах плит образуется новая кора. Все эти границы расположены в океанах. Например, вдоль всей середины Атлантического океана лежит подводный Срединно-Атлантический хребет. От него земная кора наращивается в одну сторону к Американской плите, в другую — к Африканской и Евроазиатской. Есть же границы, где плиты сталкиваются. Там происходит погружение одной из них под другую. Характерным примером такого района является Дальний Восток, где Тихоокеанская плита опускается под Евроазиатскую.

Если рождение новой коры протекает относительно спокойно, то погребение старой сопровождается сильными землетрясениями и извержениями вулканов. Причина землетрясений — трение на границах сдвигающихся плит. Накапливающиеся сдвиговые напряжения время от времени превосходят предел прочности пород, отчего и возникают резкие толчки земной коры. Извержения вулканов связаны с нагреванием осадочного слоя опускающейся плиты. При этом нагревании происходят химические реакции. Газообразные продукты этих реакций, в основном водяные пары и углекислый газ, поднимаются наверх. Выход их на поверхность образует цепь вулканов вдоль границы сталкивающихся плит.

К сожалению, более подробный рассказ об этих интереснейших явлениях природы выходит за рамки этой книги. Остановимся только на вопросе об источнике энергии тектонических явлений.

При геологических процессах происходит дифференциация, разделение вещества в поле тяжести: породы с большей плотностью преимущественно опускаются вниз, более легкие — поднимаются наверх. Поэтому силы, воздействующие на блоки отдельных пород, аналогичны архимедовым силам в жидкости, а энергия, обуславливающая в конечном счете подвижность земной тверди, — это потенциальная энергия масс различного химического состава в поле тяжести. При тектонических явлениях она выделяется в виде тепла.

Конкретные механизмы, приводящие к дрейфу континентов — движению плит, ясны еще не до конца. Интересно однако, что и на некоторых других планетах и спутниках обнаружены проявления тектонической деятельности — извержения вулканов. Это убеждает в том, что и там происходят сходные процессы в недрах.

Не правда ли, небесные тела чем-то напоминают живых существ в космических масштабах времени и пространства. За сотни миллионов лет меняется поверхность планет и спутников, отражая превращения физико-химической структуры недр. Малые небесные тела, исчерпав запасы энергии и остыв, как бы умирают, большие живут долго. Особая сложность геологической жизни Земли, длительность эволюции нашей планеты связана, как мы увидим, с ее массивным и относительно близким спутником — Луною.

5. Земля и Луна

У нашей планеты только один естественный спутник. Луна, однако, уникальное явление в Солнечной системе. Нет других примеров, где бы воздействие спутника на планету в настоящее время было так же велико, как действие Луны на Землю. Данный раздел и посвящен рассказу о том, в чем оно проявляется и каковы механизмы этого взаимодействия.

Отношение массы Луны к массе Земли равно $m_L/m_\oplus = 1/81,3$. Только у Плутона и его спутника Харона аналогичное отношение масс, возможно, больше, но эволюция этой планетной системы, по-видимому, уже закончилась — оба этих небесных тела на-

вечно обращены друг к другу одними сторонами. У других же планет массы их спутников не составляют и тысячной доли массы самой планеты.

Среднее расстояние до Луны $a_{\zeta} = 3,84 \cdot 10^8$ м в 60 раз больше земного радиуса. Есть в Солнечной системе спутники, обращающиеся относительно ближе к своим планетам, но нигде нет таких красивых солнечных затмений, как у нас. Причина затмений вам, конечно, известна. А особенность их на Земле в том, что угловые диаметры Солнца и Луны близки друг к другу. Из-за эллиптичности орбит Земли вокруг Солнца и Луны вокруг Земли ($e_{\zeta} = 0,055$) эти угловые диаметры непостоянны. Диаметр Солнца колеблется в пределах от 31,5 до 32,5, диаметр Луны изменяется от 29,4 до 33,5. Такое «случайное» пересечение обстоятельств осуществляется только на Земле. Оно дает нам возможность наблюдать и полные солнечные затмения, когда диск Луны закрывает Солнце, и кольцеобразные затмения, когда видимые размеры Солнца больше лунных. Солнечное затмение — редкое явление для каждой данной местности, но для Земли в целом за 18 лет случается 43 солнечных затмения.

Затмение — явление физически простое. Поэтому простимся с его красотой и перейдем к наиболее интересным для нас динамическим воздействиям Луны.

Сила притяжения между Землей и ее спутником есть $Gm_{\oplus}m_{\zeta}/a_{\zeta}^2$. Она вызывает орбитальное движение Луны с периодом $T_{\zeta} = 27,3$ сут. Равная по величине сила действует и на Землю. С тем же периодом обращается Земля вокруг центра масс системы Земля — Луна. Когда мы говорили о земной орбите, имелась в виду именно орбита центра масс или орбита Земли, усредненная по месячным колебаниям. Легко найти, что отклонения Земли от этой средней орбиты под действием лунного притяжения по амплитуде равны $a_{\zeta} m_{\zeta}/m_{\oplus} = 4700$ км. Траектория нашей планеты вокруг Солнца чуточку волнистая. Каждое полнолуние, когда Солнце и Луна располагаются по разные стороны от Земли, мы на полтора земных радиуса ближе к Солнцу, чем в ближайшее новолуние. Эти месячные колебания все же гораздо меньше годовых вариаций расстояния до Солнца из-за эксцентриситета земной орбиты. Они важны для точных астрономических

наблюдений тел Солнечной системы. Другие существенные физические следствия этого волнистого движения Земли неизвестны. А вот взаимодействие движения Луны и вращения Земли приводит к нескольким следствиям, важным и в ежедневном своем проявлении, и в истории нашей планеты.

Начнем с качественного объяснения прецессии земной оси. То, что именно Луна есть главная причина прецессии, знал еще Ньютон. Прецессия возникает

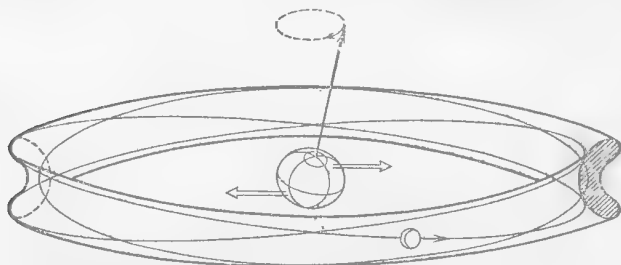


Рис. 21. Тор всевозможных лунных орбит и силы, вызывающие прецессию Земли.

в результате неравномерного гравитационного притяжения к Луне экваториального уширения земной фигуры.

Орбиту Луны можно считать эллипсом только в грубом приближении. Из-за воздействия Солнца и планет довольно быстро, с периодами в несколько десятилетий, меняется плоскость лунной орбиты и направление на перигелий. Период же прецессии, как вы помните, намного больше. Поэтому для понимания причины прецессии несущественно, где именно находится Луна в каждый данный момент. Важно, как часто за эти 26 тысяч лет бывает Луна в точках, близких к современной орбите, какой вид имеет «бублик» — тор, образованный множеством лунных орбит за это длительное время (рис. 21). Внешний радиус этого тора близок к расстоянию до апогея $a_{\zeta}(1 + e_{\zeta})$, внутренний — к расстоянию до перигея $a_{\zeta}(1 - e_{\zeta})$. Толщина этого бублика примерно равна $2a_{\zeta} \operatorname{tg} i$, где $i = 5^{\circ}9'$ — средний наклон лунной орбиты к плоскости эклиптики. Бублик совокупности лунных орбит расположен параллельно плоскости эклиптики, поскольку

изменения орбит происходят под влиянием Солнца и планет.

Если теперь мысленно распределить массу Луны по всему объему бублика, то воздействие его на Землю будет равно усредненному за большое время воздействию Луны. Но понять, как направлено это воздействие, теперь проще. Сплюснутость Земли невелика, всего одна трехсотая, но ее достаточно, чтобы притяжение бубликом экваториального уширения фигуры Земли создало пару сил, момент сил. Он стремится развернуть Землю так, чтобы экватор совпал с плоскостью эклиптики, а ось вращения Земли — с осью бублика лунных орбит.

Законы механики вращающегося тела довольно сложные. Вы знаете, что закрученная юла ведет себя далеко не так, как невращающаяся — она не падает на бок, а продолжает вертеться. При этом ось вращения юлы прецессирует, описывает конус. Так же и ось Земли под действием момента сил не принимает сразу устойчивого положения. Она прецессирует вокруг перпендикуляра к эклиптике. Те, кто знаком с динамикой вращающегося тела, легко могут перевести все эти рассуждения на язык численных оценок и получить для периода прецессии Земли выражение

$$T_{\gamma} \sim P_{\oplus} \frac{m_{\oplus}}{m_{\odot}} \left(\frac{a_{\odot}}{R_{\oplus}} \right)^3 \sim 5 \cdot 10^4 \text{ лет.}$$

Оценка дает результат, неплохо согласующийся с истинным.

Если бы Луны не было, земная ось все равно прецессировала бы под аналогичным воздействием Солнца и планет, но период прецессии тогда был бы около 100 тысяч лет. Суммарное воздействие Солнечной системы вызывает не только прецессию с постоянным углом наклона, но и приводит к медленному изменению самого угла наклона ε земной оси к эклиптике. На рис. 22 даны результаты точных расчетов того, как будет меняться величина ε в будущем. Таков же был и характер изменения угла наклона ε в прошлом: главный период его колебаний 41 тысяча лет, а огибающая амплитуд колеблется с периодом 200 тысяч лет. Эти небольшие изменения наклона оси Земли к плоскости эклиптики меняют климат Земли. Об этом будет рассказано в конце книги.

Наиболее заметным следствием близкого соседства большого спутника оказывается, конечно, не прецессия, а явление приливов и отливов. Дважды в сутки, а точнее, каждые 12 часов 25 минут, уровень открытых морей поднимается примерно на метр, затем через четверть суток море отступает. Приливы и отливы — наглядное проявление малого искажения фигуры Земли под действием лунного притяжения. Почему же главный период приливов близок к полусуткам? Ведь

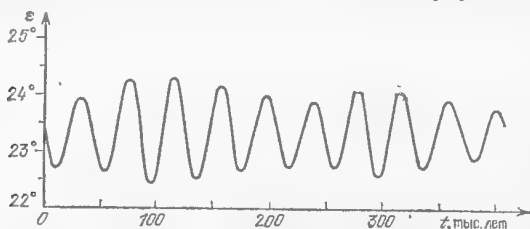


Рис. 22. Изменение угла наклона земной оси за ближайшие 400 тысяч лет.

при вращении Земли каждая ее точка приближается к Луне с периодом

$$(P_{\oplus}^{-1} - T_{\zeta}^{-1})^{-1} = 24 \text{ часа } 50 \text{ минут}$$

— вдвое бóльшим приливного. Отчего же возникают два горба приливов, оббегающих Землю при ее вращении?

Сила притяжения Луны, как вы помните, вызывает движение Земли вокруг центра масс Земля—Луна с ускорением Gm_{ζ}/a_{ζ}^2 . Однако на тело массы m , расположенное на Земле ближе к Луне, она воздействует с силой $Gmm_{\zeta}/(a_{\zeta} - R_{\oplus})^2$, а на такое же тело, расположенное на противоположной стороне Земли,— с силой $Gmm_{\zeta}/(a_{\zeta} + R_{\oplus})^2$. Получается, что первое тело должно ускоряться сильнее, чем Земля в среднем, а второе — слабее. Поэтому приливный горб на стороне Земли, обращенной к Луне, возникает, как результат усиленного притяжения его самого, а приливный горб на обратной стороне Земли — как результат того, что притяжение Земли в среднем сильнее притяжения ее дальней стороны. Эти горбы утрированно изображены на рис. 23,

Эти рассуждения позволяют получить следующую оценку искажения фигуры Земли под действием лунного притяжения: высота прилива по порядку величины равна

$$\delta R_{\oplus} \sim R_{\oplus} \frac{m_{\odot}}{m_{\oplus}} \left(\frac{R_{\oplus}}{a_{\odot}} \right)^3 \sim 0,36 \text{ м.}$$

Такая оценка высоты прилива на Земле более или менее справедлива для твердой оболочки, коры Земли. Океан же, плотность которого меньше плотности земной коры, откликается на приливное воздействие сильнее, чем суша. В открытом океане, впрочем, средняя высота прилива всего лишь около полуметра.

Наблюдаемая высота прилива сильно возрастает вблизи берегов. Наиболее высокие приливы бывают в сужающихся заливах и в мелководных Беринговом и Охотском морях, поглощающих энергию прилива Тихого океана. Вообще морские приливы особенно сильны

на географической широте φ около 50° , и северной, и южной. Там приливные горбы движутся по поверхности Земли со скоростью $\omega_{\oplus} R_{\oplus} \cos \varphi \simeq 290 \text{ м/с}$. Эта скорость оказывается близкой к скорости распространения самых длинных волн в океане. Поэтому прилив как бы переносится океанской волной, попутно усиливаясь. Наибольшая разность между высокой и низкой водой зарегистрирована в заливе Фанди, в Канаде, на широте 45° : там она достигает 18 метров!

Морские приливы наиболее заметны для нас. Но не надо забывать, что приливное воздействие искажает и атмосферу Земли: она тоже немного вытянута в сторону Луны и в противоположную сторону. Эта вытянутость атмосферы, впрочем, вызывает колебания атмосферного давления у поверхности, ничтожно малые по сравнению с их отклонениями от среднего при изменении погоды.

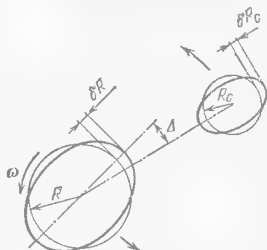


Рис. 23. Схема приливов на вращающейся планете и ее спутнике.

Приливы на Земле вызываются не только Луною, но и Солнцем. Высоту солнечного прилива можно оценить точно так же, как и высоту лунного:

$$\delta R_{\oplus}^{(\odot)} \sim R_{\oplus} \frac{m_{\odot}}{m_{\oplus}} \left(\frac{R_{\oplus}}{a_{\oplus}} \right)^3 \sim 0,16 \text{ м.}$$

Отсюда видно, что воздействие Солнца на приливы вдвое меньше воздействия Луны. Высота приливов достигает наибольших значений, когда Солнце и Луна действуют совместно. Легко понять, что такая ситуация складывается в полнолуние и в новолуние, когда Солнце, Земля и Луна расположены на одной прямой.

Притяжение Луны вызывает прилив на Земле. А вызывает ли Земля прилив на Луне? Оценим, какое искажение фигуры Луны должно возникнуть из-за притяжения Земли:

$$\delta R_{\zeta} \sim R_{\zeta} \frac{m_{\oplus}}{m_{\zeta}} \left(\frac{R_{\zeta}}{a_{\zeta}} \right)^3 \sim 13 \text{ м.}$$

К вопросу о фигуре Луны мы вернемся чуть позже, — она искажена не на десяток метров, а гораздо серьезнее.

Есть еще одно и очень важное следствие близкого соседства большого спутника. Оно нигде в Солнечной системе сейчас не проявляется так сильно, как для Земли. Луна тормозит вращение нашей планеты!

Посмотрите еще раз на рис. 23. Земля вращается с большей угловой скоростью, чем вокруг нее обращается Луна. Поэтому вращение Земли немного увлечает за собою приливные горбы. Они оказываются не точно на прямой Земля — Луна, а чуть повернуты в сторону вращения Земли. Этот угол увлечения оценивается в 2° . Вызванная этим смещением асимметрия притяжения приливных горбов к Луне создает малый момент сил, замедляющий земное вращение. Расчеты показывают, что каждый год угловая скорость Земли должна убывать примерно на $2 \cdot 10^{-10}$ от своей величины. Следовательно, длительность суток должна возрастать каждый год на величину порядка $2 \cdot 10^{-5}$ с. Можно ли экспериментально заметить такое малое замедление вращения?

Относительная точность современных атомных часов составляет 10^{-14} , т. е. их погрешность за год не превышает $3 \cdot 10^{-7}$ с. Однако непосредственному из-

мерению векового замедления вращения Земли мешают существенные сезонные флуктуации скорости вращения. Вызывают их, главным образом, атмосферные ветры. Масса атмосферы составляет 10^{-6} массы Земли. Поскольку атмосфера с земной твердью жестко не связана, то ее вращение отчасти независимо. Поэтому сезонные ветры (муссоны) приводят к тому, что в апреле звездные сутки Земли на несколько десятитысячных долей секунды длиннее звездных суток в августе. На фоне таких колебаний трудно точно измерить малое постоянное замедление вращения.

Первые измерения векового замедления вращения были, однако, сделаны, когда еще не существовало атомных часов. Помогла их сделать все та же Луна, вернее, вызванные ею солнечные затмения. Чтобы понять, как это удалось, посмотрим, на какой угол отстает Земля из-за замедления вращения, допустим, за $t = 2000$ лет $= 6,31 \cdot 10^{10}$ с. Для величины замедления примем значение $-\dot{\omega} = 4,81 \cdot 10^{-22}$ с $^{-2}$, наиболее надежное по современным данным. Аналогично формуле пути при равнозамедленном движении, для величины угла отставания получим $\delta = -\dot{\omega}t^2/2 = 55^\circ$. На такой угол Земля поворачивается за 3,5 часа.

Если теперь мы будем считать скорость вращения Земли постоянной и вычислим обстоятельства полных солнечных затмений древности, то окажется, что эти затмения должны были бы наблюдаться на несколько десятков градусов западнее тех пунктов, где они на самом деле были отмечены. Именно исторические свидетельства о нескольких солнечных затмениях до нашей эры и дали возможность сделать первые оценки векового замедления вращения Земли.

Момент сил, замедляющий Землю, вызван Луной. В то же время он увеличивает орбитальный момент импульса Луны. Взгляните еще раз на рис. 23 — приливные горбы Земли «тянут» за собой Луну. Из-за этого воздействия Луна очень медленно удаляется от Земли. Среднее расстояние до нее растет на 3 см в год. Интересно, что характерное время эволюции системы Земля — Луна оказывается как раз порядка возраста Солнечной системы.

Мы пока не знаем точно, как образовалась Луна. В прошлом, однако, она определенно была ближе к Земле. Взглянем с этой точки зрения на ее фигуру.

Траектории искусственных спутников Луны показали, что центр масс Луны смещен в сторону Земли по отношению к ее геометрическому центру на 2—3 километра, а отнюдь не на десяток метров, как требовало бы равновесие сегодня. Такое искажение фигуры Луны было близким к равновесному, когда Луна находилась на расстоянии в 5—6 раз ближе к Земле, чем теперь.

Возможно, миллиарды лет назад большие приливные силы навсегда повернули Луну к Земле одной стороной, и тело ее «запомнило» большой прилив того времени. Вспомните, что и Земля имеет сейчас такую фигуру, которая соответствует ее скорости вращения в прошлом. Однако «память» Земли короче — «всего» каких-нибудь 10 миллионов лет.

Замедление вращения Земли меняет ее равновесную фигуру. Изменение фигуры планеты связано с движением слагающих ее масс, что отражается и на внешнем ее облике. Это означает, что геологическая история нашей планеты еще далеко не закончена. У нас впереди еще несколько миллиардов лет до тех пор, когда приливы окончательно затормозят вращение Земли относительно Луны, навсегда повернут Землю к Луне одной стороной.

СОЛНЦЕ — ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

1. Первые сведения о Солнце

Дальнейшее описание Земли, ее атмосферы и океана, ее климата, невозможно без рассказа о главном источнике энергии Солнечной системы, о нашей звезде — Солнце. Давайте совершим краткое путешествие на Солнце, в его недра, где в ядерных превращениях рождается солнечная энергия. Каждому путешествию, даже теоретическому, должна предшествовать подготовка. Вот и нам потребуется небольшой багаж предварительных знаний о Солнце, те сведения о нем, которые вам, возможно, уже хорошо известны.

Как вы знаете, Солнце удалено от Земли в среднем на расстояние $a_{\oplus} = 1,496 \cdot 10^{11}$ м. На этом расстоянии оно выглядит, как ярко светящийся диск с угловым диаметром чуть большим полуградуса, точнее, $9,3 \cdot 10^{-3}$ радиана. Зная это, легко вычислить радиус Солнца: $R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^8$ м — он в 109 раз больше радиуса Земли.

Масса Солнца нам известна из закона всемирного тяготения и движения планет: $m_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30}$ кг. Из этого же закона легко найти и ускорение свободного падения на поверхности Солнца: $g_{\odot} = Gm_{\odot}/R_{\odot}^2 = 274 \text{ м/с}^2$ — оно почти в тридцать раз больше земного. Вычислим теперь среднюю плотность нашего светила:

$$\rho_{\odot} = \frac{3m_{\odot}}{4\pi R_{\odot}^3} = 1,41 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

На первый взгляд этот результат кажется удивительным. Ведь масса Солнца так велика, и ускорение на его поверхности большое, — казалось бы, и вещество Солнца должно быть сильно сжато. А на самом деле средняя плотность его чуть больше, чем у воды, и заметно меньше, чем средняя плотность Земли $\rho_{\oplus} = 5,52 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Причиной этого является, как мы

увидим, низкая молекулярная масса солнечного газа и высокая температура солнечных недр. А что можно сказать о температуре Солнца при поверхностном знакомстве?

Вспомните законы теплового излучения, о которых рассказывалось в первой главе. Чтобы узнать температуру солнечной поверхности, нужно прежде всего исследовать спектр солнечного света — найти, какая доля энергии приходится на малый интервал частот

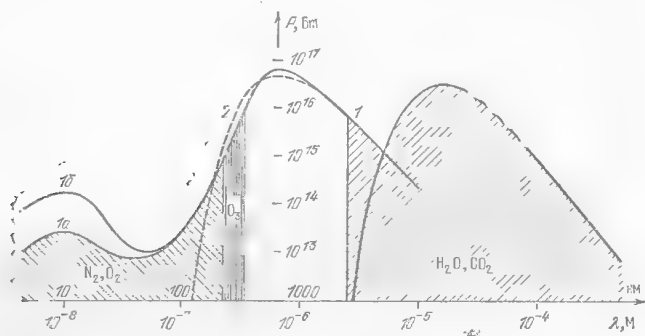


Рис. 24. Спектральные распределения энергии. 1а — энергия, приходящая к Земле при спокойном Солнце; 1б — энергия, приходящая к Земле при активном Солнце; 2 — равновесный тепловой спектр при температуре 5870 К; 3 — тепловой спектр Земли при температуре 257 К. Заштрихованы области поглощения газов земной атмосферы.

$d\omega$ для всех частот солнечного излучения. Посмотрите на рис. 24. Оказывается, солнечный спектр довольно близок планковскому спектру равновесного теплового излучения, а температура поверхности Солнца $T_{\odot} = 5780$ К. Интересно заметить, что при такой температуре наибольшая энергия излучается как раз в том участке спектра, к которому чувствителен человеческий глаз: в диапазоне длин волн от 400 до 800 нм. Случайно ли это? Вряд ли. Наверное, глаза живых существ и должны приспосабливаться к самому яркому участку спектра окружающего их света.

Температуру поверхности Солнца можно найти и с помощью другого эксперимента. Можно измерить, какая энергия во всем спектре приносится солнечными лучами за секунду на единичную площадь, скажем, на квадратный метр земной поверхности, обращенной к Солнцу. Эта величина, s_0 , как мы увидим, очень

важна для объяснения земного климата. Оказывается, что она практически неизменна — поток энергии от Солнца не меняется. Поэтому величину $s_{\odot}$ и называют солнечной постоянной. Измерять ее лучше со спутника, за пределами земной атмосферы, поглощающей часть солнечного излучения. Солнечная постоянная равна $1,36 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$.

Такой поток энергии падает на земную поверхность, обращенную к Солнцу. Но оно светит одинаково во все стороны, следовательно, такова и мощность солнечных лучей, пронизывающих каждый квадратный метр всей сферы радиуса $a_{\oplus}$ вокруг Солнца. Умножив $s_{\odot}$ на площадь поверхности этой сферы, можно узнать, какую энергию излучает Солнце за секунду. Эта величина называется светимостью Солнца: $L_{\odot} = 4\pi a_{\oplus}^2 s_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$.

Весь поток солнечной энергии проходит, конечно, и через солнечную поверхность. Какова там плотность потока энергии, т. е. какая мощность излучается квадратным метром поверхности Солнца? Разделим светимость Солнца на площадь его поверхности $4\pi R_{\odot}^2$ и получим, что плотность потока излучения или, другими словами, яркость Солнца, равна $S = L_{\odot}/4\pi R_{\odot}^2 = 6,29 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$.

Но нам известен закон Больцмана, связывающий плотность потока S с температурой излучающей поверхности. Можно поэтому и другим способом вычислить поверхностную температуру Солнца. Она оказывается той же самой, что и температура, найденная по солнечному спектру: $T_{\odot} = (S/\sigma)^{1/4} = 5780 \text{ К}$.

Спектр Солнца, однако, немного отличается от спектра излучения абсолютно черного тела даже в той области рис. 24, где они показаны совпадающими. Эти малые отличия несут информацию о том, какие химические элементы присутствуют на Солнце. Дело в том, что каждый атом имеет свой собственный, характерный только для него спектр излучения, состоящий из очень узких линий. Еще в начале прошлого века немецкий оптик Йозеф Фраунгофер обнаружил в спектре Солнца множество темных линий. При этом оказалось, что длины волн, на которых замечены в спектре фраунгоферовы темные линии, точно соответствуют спектрам химических элементов. Почему фраунгофе-

ровы линии темные, мы расскажем в разделе, посвященном солнечной поверхности. Сейчас же важно то, что по различной интенсивности линий разных элементов удалось установить относительное содержание этих элементов вблизи поверхности Солнца. Поскольку известно, что и атмосфера, и недра Солнца до значительных глубин сильно перемешаны, этот же состав можно считать близким к среднему составу Солнца.

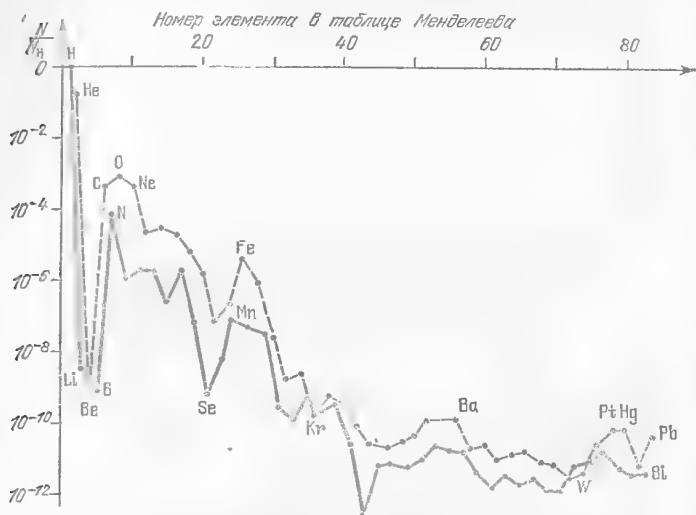


Рис. 25. Распространенность элементов в Солнечной системе относительно распространенности водорода. Сплошными отрезками соединены точки элементов с нечетными номерами, штриховыми — с четными.

Оказалось, что по числу атомов Солнце на 91 % состоит из водорода, на 9% — из гелия, остальные элементы присутствуют в малых количествах. По массе гелий вносит заметно больший вклад, 27%, поскольку масса его атома вчетверо больше массы атома водорода. Интересно, что гелий был первоначально открыт именно на Солнце по своему фраунгоферовому спектру, не подходившему другим элементам, а на Земле он был обнаружен значительно позже. От греческого гелиос — Солнце — происходит и название этого элемента.

Вспомните, примерно такую же массовую долю гелия предсказывает космологическая теория образования элементов, о которой рассказывалось в гл. I. Однако первичный, дозвездный состав материи вовсе не содержал тяжелых элементов, на Солнце же, кроме водорода и гелия, присутствуют почти все остальные элементы таблицы Менделеева. Их общая доля по массе, однако, невелика, меньше 3%. Среди них больше всего кислорода, азота и углерода. Посмотрите на рис. 25, представляющий распространенность элементов во всей Солнечной системе, помня, что Солнце составляет подавляющую долю ее массы. Интересная особенность: элементов с четными номерами в среднем примерно в 10 раз больше, чем их соседей с номерами нечетными. Качественно такая зависимость станет понятна, когда мы узнаем, как в недрах звезд из водорода и гелия образуются остальные элементы.

2. Недра Солнца

Отчего звезды светят? Откуда берется та огромная энергия, которую непрерывно излучает солнечная поверхность? Как устроено Солнце внутри? Может показаться, что сами эти вопросы бессмысленны, что узнать это невозможно — ведь не может же там побывать человек. Даже приборы, сделанные его руками, не могут выдержать огромных температур и давлений солнечных недр. Тем не менее, очень многое из того, что происходит внутри звезд, внутри Солнца, нам уже известно с большой достоверностью. И как ни странно, это даже не очень сложно понять.

Возможность изучения звездных недр дает теория. Однако можно ли верить теоретическим рассуждениям, опирающимся на опыты жителей Земли? Ведь эксперименты на Земле проводятся в условиях, очень далеких от звездных. Ответ здесь такой: надо попробовать рассчитать строение Солнца в предположении, что наши теоретические представления верны. Если результаты будут разумны, будут согласовываться с наблюдениями, это означает, что основные теоретические положения справедливы и в необычных условиях. Попробуем?

Начнем с того, что постараемся найти связь между давлением, температурой и плотностью того вещества,

из которого состоит Солнце. На его поверхности газ состоит преимущественно из нейтральных атомов, так как молекулы водорода при температуре солнечной поверхности распадаются на отдельные атомы. Вскоре мы увидим, что температура в недрах Солнца очень велика не только в сравнении с земными мерками, но и с температурой его поверхности. Уже на небольшой глубине она становится настолько большой, что распадаются не только молекулы, но и атомы. Электроны атомных оболочек отрываются от ядер — газ становится плазмой.

Плазма — это электрически нейтральная смесь отрицательно заряженных электронов и положительно заряженных ядер атомов. Из земных экспериментов известно, что плазму с хорошей точностью можно рассматривать, как смесь идеальных газов: газа электронов и газа ядер. Для простоты будем считать, что солнечная плазма состоит всего из трех сортов частиц: на каждые 91 протон (ядро водорода) приходится 9 ядер гелия и оторвавшиеся от них 109 электронов.

Вам известно уравнение Менделеева — Клапейрона, связывающее давление, плотность и температуру идеального газа. Запишем его не для плотности ρ , а для концентрации частиц n . Обычная плотность каждого отдельного газа есть произведение концентрации его частиц на массу одной частицы m :

$$p = nkT; \quad \rho = nm.$$

Один из сомножителей правой части — постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Эти уравнения справедливы для каждого идеального газа смеси. Нам же нужно уравнение, связывающее общее давление с общей плотностью и с температурой. Температура у всех газов при равновесии одна и та же. Общая плотность есть сумма отдельных плотностей. Общее давление есть сумма отдельных или, как говорят, парциальных давлений.

Масса ядра гелия в 4 раза больше массы протона, а масса электрона по сравнению с ними ничтожно мала. И последнее: нам известно, что плотности частиц — электронов n_e , протонов n_p и ядер гелия n_α — соотносятся между собою, как $n_e : n_p : n_\alpha = (2 - X) : X : (1 - X) = 109 : 91 : 9$. Здесь через X обозначена

доля протонов. Сведем теперь всё сказанное в таблицу формул (см. табл. 6).

При изучении этой таблицы полезно вспомнить, что постоянная Авогадро $6,03 \cdot 10^{26} \text{ кг}^{-1}$ практически равна m_p^{-1} , а ее произведение на постоянную Больцмана есть газовая постоянная $8,31 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. И тогда вы убедитесь, что полученное нами уравнение

Таблица 6

Уравнения состояния газов в плазме Солнца

	Концентрация частиц	Давление	Плотность
Электроны	$n_e = \frac{2-X}{3-X} n$	$p_e = \frac{2-X}{3-X} nkT$	$\rho_e = 0$
Протоны	$n_p = \frac{X}{3-X} n$	$p_p = \frac{X}{3-X} nkT$	$\rho_p = m_p \frac{X}{3-X} n$
Ядра гелия	$n_a = \frac{1-X}{3-X} n$	$p_a = \frac{1-X}{3-X} nkT$	$\rho_a = 4m_p \frac{1-X}{3-X} n$
Сумма	$n = n_e + n_p + n_a$	$p = nkT$	$\rho = \frac{4-3X}{3-X} m_p n$
Результат	$p = nkT = \frac{\rho}{\mu m_p} kT; \quad \mu = \frac{4-3X}{3-X} = 0,61$		

солнечного вещества есть обычное уравнение Менделеева — Клапейрона для газа с молекулярной массой $\mu = 0,61$.

Средняя молекулярная масса получилась такой маленькой (меньшей единицы) из-за малой массы электрона. Электронная составляющая плазмы не вносит заметного вклада в плотность, а давление создает большее, чем протоны и гелий вместе. Малость молекулярной массы солнечного газа является одной из причин того, что средняя плотность Солнца невелика.

Теперь у нас есть уравнение, описывающее плазму глубинных солнечных недр. Средняя плотность Солнца нам известна. Давайте попробуем оценить по порядку величины давление и температуру центральных областей Солнца. Давление в недрах массивных небесных тел мы уже оценивали в предыдущей главе.

Те же соображения применимы и к Солнцу. Вещество внутри него сжато гравитационным притяжением. Поэтому для грубой оценки среднего давления внутри Солнца используем те же формулы, что и для давления внутри планет:

$$p_{\odot} \sim \rho_{\odot} g_{\odot} R_{\odot} \sim \frac{G m_{\odot}^2}{R_{\odot}^4} \sim 10^{15} \text{ Н/м}^2.$$

Зная среднее давление и среднюю плотность, с помощью уравнения солнечной плазмы нетрудно оценить и температуру центральных областей Солнца:

$$T_c \sim \frac{p_{\odot} m_p}{k \rho_{\odot}} \sim \frac{G m_{\odot} m_p}{k R_{\odot}} \sim 2 \cdot 10^7 \text{ К.}$$

Двадцать миллионов кельвинов. Это, конечно, только оценка, но она не так уж далека от результатов точных расчетов. А как же рассчитывают внутреннее строение Солнца и других звезд?

При точных расчетах весь объем звезды рассматривается как составленный из множества тонких сферических оболочек. В каждом из таких слоев свое давление, своя температура и плотность, слабо отличающиеся от этих величин в соседних слоях. Далее эти малые изменения параметров от слоя к слою рассчитываются с учетом ядерных реакций, выделяющих энергию, переноса этой энергии из глубин наружу, гравитационного притяжения к центру и давления наружных оболочек. Эти уравнения для малых приращений всех существенных величин от слоя к слою называются дифференциальными.

После этого задача становится чисто математической и решается с помощью электронно-вычислительных машин — рассчитываются зависимости от радиуса всех величин: температуры $T(r)$, плотности $\rho(r)$, давления $p(r)$, ускорения тяготения $g(r)$ и массы $m(r)$, заключенной внутри радиуса r . На рис. 26 приведен пример результатов такого расчета.

Заметьте интересную особенность: ускорение тяготения максимально не на поверхности, а на довольно большой глубине, при радиусе всего в 0,217 солнечного. В максимуме оно в 6,5 раз больше, чем ускорение на поверхности Солнца $g_{\odot}$. Плотность, давление и температура монотонно убывают с радиусом.

Однако давление и плотность резко падают вблизи самой поверхности Солнца, а температура начинает быстро уменьшаться уже на расстоянии одной пятой солнечного радиуса от центра. Это позволяет выделить в Солнце центральную область, называемую ядром. Ядро — наиболее горячая часть Солнца с почти однородной высокой плотностью, в сотню раз большей

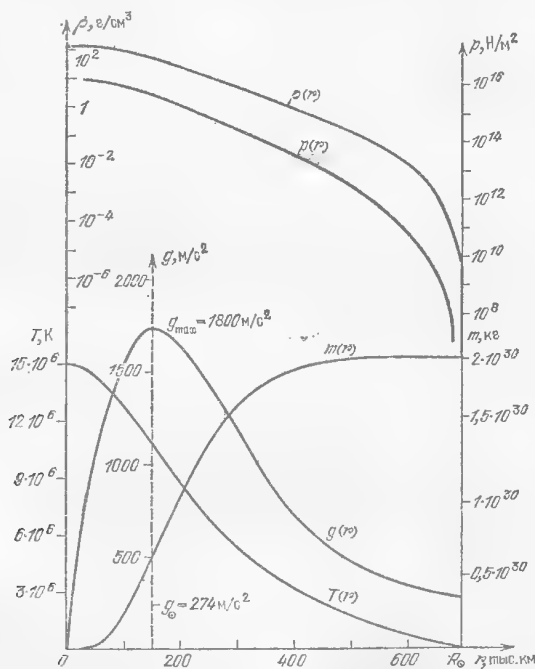


Рис. 26. Изменение в недрах Солнца температуры T , ускорения g , плотности ρ , давления p и массы, заключенной внутри радиуса r .

средней. Именно ядро и является источником почти всей солнечной энергии, все же остальное — это «одеяло» ядра, не дающее ему остыть, медленно проводящее к поверхности энергию центральной области.

Насколько точны эти расчеты, достаточно ли хорошо знаем мы солнечные глубины? Основная трудность в построении моделей Солнца состоит в том, что нам недостаточно известен химический состав недр, —

диффузия тяжелых элементов в ядре Солнца может быть заметно большим, чем на его поверхности. Этот состав тоже рассчитывается в различных предположениях о перемешивании солнечной плазмы, но неопределенность его пока не мала. Тем не менее, считается, что точность, с которой нам известны параметры солнечных глубин, составляет примерно 10%. Уверенность в этом подтверждается тем обстоятельством, что температура и плотность вещества в ядре Солнца оказались именно такими, какие нужны для поддержания там ядерных реакций.

В глубоких недрах Солнца температура так велика, что все вещество ионизовано полностью, состоит из атомных ядер и свободных электронов. Однако при подъеме к солнечной поверхности последовательно происходят две рекомбинации гелия и рекомбинация водорода. Рекомбинация означает воссоединение: из ионов и электронов образуются сначала ионы с меньшим зарядом, а затем электрически нейтральные атомы.

При рекомбинации средняя молекулярная масса μ увеличивается. Если в ядре Солнца $\mu < 1$, благодаря вкладу легких электронов, то вблизи поверхности свободных электронов мало и $\mu = 3 - 2X = 1,27$. Газ с большей молекулярной массой при равных условиях имеет большую плотность. Такая ситуация способствует возникновению конвекции в оболочке Солнца при расстоянии от центра $r > 0,7 R_{\odot}$.

Что такое конвекция? Отвлечемся на минуту от Солнца и обратимся к опыту повседневных впечатлений. Если посмотреть вдаль над костром, можно заметить, что очертания предметов расплываются и дрожат. Вы видели это явление и над раскаленным асфальтом шоссе в летний полдень, и в кастрюле с водой, поставленной на плиту. Мерцание звезд — тоже проявление конвекции в земной атмосфере: теплые струи поднимаются, холодные опускаются на их место. Мы видим это движение потому, что путь луча в такой перемешивающейся среде не прям, он искривляется при переходе границ струй.

Условие возникновения конвекции далеко не очевидно. Оказывается, недостаточно, чтобы среда сверху была холоднее нижней, — для конвекции необходимо, чтобы падение температуры с высотой превосходило

некоторый предел. Увеличение с высотой средней молекулярной массы существенно способствует конвекции, ведь сверху оказывается потенциально более тяжелый газ. На Солнце это происходит при рекомбинации, а в земной атмосфере — при конденсации паров воды в облаках.

3. Энергия ядерных реакций

Эти реакции называются ядерными не потому, что они происходят в солнечном ядре, а потому, что реагируют ядра атомов. При высоких температурах и давлениях ядра легких элементов при столкновении могут соединяться и образовывать ядра новых, более тяжелых элементов.

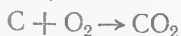
Источник энергии звезд в прошлом веке был неизвестен. В 1905 году при создании теории относительности А. Эйнштейн обнаружил, что закон сохранения энергии и закон сохранения массы, хорошо известный из химии, есть на самом деле единый закон. Масса системы до и после взаимодействия может оказаться различной, но разность масс или, как говорят, дефект массы Δm , в точности компенсируется изменением кинетической энергии системы: $\Delta E = -mc^2$. Таким образом, в любых реакциях сумма $E + mc^2$, полная энергия системы, сохраняется точно.

Экспериментальную проверку этого утверждения удалось провести только после открытия возможности ядерных превращений, ядерных реакций Э. Резерфордом в 1918 году. А вот что писал уже в 1921 году немецкий физик В. Нернст: «Установленное Эйнштейном соотношение является основанием для дальнейших, значительно более важных выводов. Радиоактивная отслойка является с этой точки зрения одной из возможностей получения из материи огромных запасов энергии. Техническое использование таких запасов энергии в принципе не представляется невыполнимым. И совсем недавно Резерфорд получил, по-видимому, подобные количества энергии, — правда, в микроскопическом масштабе, — когда ему удалось разложить азот путем радиоактивного расщепления. Но не нужно предаваться иллюзии, будто техническая добыча указанной здесь энергии является вопросом непосредственного будущего, и что этим будет достигнуто

обесценивание угля; с другой стороны, нельзя возражать и против того, что тут раскрывается одна из серьезнейших технических проблем». Как тут одновременно не удивиться и тому, как много дала нам наука за последние 80 лет, и тому, как прозорливо видели перспективу некоторые ученые в самом начале пути.

Закон сохранения энергии — массы справедлив, конечно, и для химических реакций. Там, однако, изменение массы продуктов реакции по сравнению с начальной так ничтожно, что его почти невозможно обнаружить экспериментально.

Действительно, посмотрим, на сколько уменьшается масса в химической реакции, например, сгорания угля. Удельная теплота реакции



есть $q = 3,3 \cdot 10^7$ Дж/кг. Это означает, что при сгорании 12 кг угля, с которым вступает в реакцию 32 кг кислорода, выделяется $3,96 \cdot 10^8$ Дж энергии. Она эквивалентна $4,4 \cdot 10^{-9}$ кг массы. Именно на столько меньше образуется углекислого газа по сравнению с массой углерода и кислорода до реакции. Но можно ли заметить такую малую относительную убыль, 10^{-10} , по отношению к массе реагентов? Нет. Да никто и не пытается этого сделать — не нужно. Достаточно того, что закон эквивалентности массы и энергии можно экспериментально проверить в ядерной физике. Закон сохранения массы по-прежнему справедлив и в химии, и в повседневной жизни, — масса вещества сохраняется с колоссальной точностью 10^{-10} . А при ядерных реакциях, при превращении элементов, относительное изменение массы уже заметно. Поэтому и выделение энергии при ядерных реакциях гораздо больше, чем при химических.

Читатель, конечно, знает, что атомные ядра можно считать состоящими из положительно заряженных протонов и электрически нейтральных нейтронов. Число протонов в ядре равно порядковому номеру элемента. В нейтральном атоме число электронов, заряженных отрицательно, совпадает с числом протонов. В атомах электроны движутся вокруг ядер на расстояниях 10^{-10} — 10^{-9} м. Ими определяются химические свойства элементов. Изменение числа нейт-

ронов в ядре не сказывается на химической природе атома. Оно дает ядерные видоизменения элементов, изотопы, отличающиеся массой ядер.

Атомные массы большинства химических элементов, как вы знаете, близки к целым числам. Еще ближе к целым числам атомные массы отдельных изотопов. Происходит это потому, что масса протона m_p близка к массе нейтрона m_n , а энергия связи этих частиц в ядре меньше, чем $m_p c^2$.

Энергия связи создается ядерными силами. Эти силы являются силами притяжения, действующими между частицами атомных ядер, протонами и нейтронами. При этом ядерное притяжение почти не зависит от вида частицы: взаимодействие двух нейтронов такое же, как двух протонов и совпадает с ядерным взаимодействием между протоном и нейтроном. Но в отличие от электромагнитных сил ядерные силы действуют только на очень малых расстояниях.

Радиус ядерного взаимодействия $r_0 \simeq 1,5 \cdot 10^{-15}$ м примерно совпадает с размерами протона и нейтрона. Если несколько протонов и нейтронов находятся на расстояниях порядка r_0 , то они объединены ядерными силами в компактную группу — атомное ядро. Объем атомных ядер возрастает пропорционально суммарному числу протонов и нейтронов в ядре. Этим свойством атомные ядра напоминают капли несжимаемой жидкости, у которых объем тоже пропорционален массе. Размеры ядер в сотни тысяч раз меньше размеров атомов. Размер даже тяжелых ядер порядка нескольких радиусов взаимодействия r_0 .

Притяжение ядерных сил намного превосходит электрическое отталкивание протонов на таких малых расстояниях. Но уже на расстояниях в несколько размеров ядер ядерные силы становятся чрезвычайно малыми. При перестройке атомных ядер при ядерных реакциях короткодействующие, но большие силы притяжения совершают на расстояниях порядка r_0 вполне заметную работу. Эта работа и приводит к появлению дефекта масс. В то же время уменьшение суммарной массы при ядерных реакциях приводит к выделению энергии. Это кинетическая энергия продуктов реакции, вновь образовавшихся ядер и энергия частиц, в частности, энергия фотона, кванта электромагнитного излучения, выделяющегося при

реакции. В конечном счете большая часть всей энергии, выделяющейся при ядерных реакциях в недрах звезд, переходит в тепловую энергию. Быстро движущиеся частицы тормозятся окружающим веществом, фотоны тоже поглощаются плазмой.

Уравнение реакции должно удовлетворять нескольким законам сохранения. Это, во-первых, закон сохранения электрического заряда: алгебраическая сумма зарядов должна быть одинакова в левой и правой частях уравнения. Во-вторых, должно сохраняться суммарное число свободных и связанных в ядрах протонов и нейтронов. Его называют барионным числом. Наконец, последнее правило: если в ходе реакции должен появиться электрон e^- или его античастица, позитрон e^+ , то одновременно должно появиться и нейтрино. Электроны, позитроны, нейтрино совместно называются лептонами, а этот последний закон — сохранением лептонного заряда.

Нейтрино — частица с нулевым электрическим зарядом и нулевой массой. Она практически не взаимодействует с остальными частицами и, родившись, улетает со скоростью света. Нейтрино, образующиеся в недрах Солнца, без задержки, без рассеяния и поглощения, пронизывают всю его толщу. При этом энергия, которую они уносят, не переходит в тепло. Нас же, в первую очередь, будет интересовать та часть ядерной энергии, которая нагревает центральную область Солнца.

При ядерных реакциях «сгорает» — переходит в тепло или уносится нейтрино — относительно небольшая доля массы частиц. Поэтому, чтобы не ошибиться в разности, нам понадобятся значения масс элементарных частиц с довольно высокой точностью (см. табл. 7).

Обратите внимание, что масса атома кислорода, т. е. сумма массы его ядра и восьми электронов, в точности равна 16. Это следует из строгого определения массы атомной единицы, принятого в физике. При переводе разницы масс в энергию надо будет учитывать, что атомная единица имеет массу $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг и эквивалентна энергии 0,93 ГэВ или $1,49 \cdot 10^{-10}$ Дж.

Начнем первую ядерную реакцию. Пусть сталкиваются два протона. Между ними действует сила

электрического отталкивания, поэтому вероятность их слияния очень мала, мы оценим ее позже. Событие это, однако, все же возможное. Итак, слева в уравнении два протона. Какой может быть их судьба? Для сохранения барионного заряда нужно взять дейтрон, ядро изотопа водорода, дейтерия. Для сохранения электрического заряда следует добавить позитрон. При появлении позитрона из-за сохранения

Таблица 7

Массы частиц и ядер (атомные единицы)

Частица	Символ	Масса	Частица	Символ	Масса
Нейтрино	ν	0	Ядро трития	^3T	3,0170
Электрон	e	0,00055	Ядро гелия-3	^3He	3,0159
Позитрон	e^+	0,00055	Ядро гелия-4	^4He	4,0028
Нейтрон	n	1,0090	Ядро углерода	^{12}C	12,0005
Протон	^1p	1,0076	Ядро кислорода	^{16}O	15,9956
Дейтрон	^2d	2,0142			

лептонного заряда в реакции возникает еще и нейтрино:



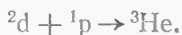
Позитрон должен аннигилировать с электроном, они в избытке присутствуют в плазме: $e^+ + e \rightarrow 0$. Объединим поэтому эти две реакции:



Подсчитаем массы частиц, вступивших в реакцию: $2m_p + m_e = 2,01575$. Масса продуктов реакции, масса дейтрона, равна 2,0142. Таким образом, масса уменьшилась на $\Delta m = 0,00155$ атомных единиц. Этот дефект массы перешел в кинетическую энергию продуктов реакции и в энергию электромагнитного излучения. Большую часть этой энергии, $E = \Delta mc^2 = 2,31 \cdot 10^{-13}$ Дж = 1,45 МэВ, уносит с собой нейтрино.

Дейтрон — стабильная частица, она самопроизвольно не распадается. В земной воде один атом дейтерия, тяжелого водорода, приходится на каждые 7 тысяч атомов обычного водорода. Однако при температуре солнечного ядра дейтрон с большой

вероятностью вступает в ядерную реакцию с протоном:



Дефект масс здесь равен 0,0059 атомных единиц. Энергия, выделяющаяся при этой реакции, $8,8 \times 10^{-13}$ Дж = 5,5 МэВ, уже целиком идет на нагревание окружающей плазмы.

Изотоп гелия с массой 3 тоже устойчив. Однако его доля по отношению к более распространенному изотопу, гелию-4, совсем не велика. На Земле она составляет только $10^{-4}\%$. Распространенность этого изотопа так мала потому, что при температурах и давлениях, которые существуют в недрах звезд, гелий-3 с большой вероятностью вступает в разные ядерные реакции. Наиболее вероятная из них такая:



Подсчитаем дефект масс и этой реакции: $\Delta m = 0,0138$. Это означает, что при ней выделяется энергия $2,06 \cdot 10^{-12}$ Дж = 12,9 МэВ. Ядра гелия-4 при тех температурах и давлениях, которые существуют в солнечном ядре, в дальнейшие ядерные реакции практически не вступают. Протонный цикл реакций закончен.

Подведем его итог. Было израсходовано шесть протонов и два электрона, а получено ядро гелия-4, два нейтрино и два протона. Полный дефект масс цикла равен 0,0287. Это означает, что в энергию перешло 0,7% начальной массы. Образование каждого ядра гелия сопровождается выделением энергии, равной $4,28 \cdot 10^{-12}$ Дж, или 26,8 МэВ. Два нейтрино унесут часть этой энергии. Будем считать приближенно, что они заберут с собой всю энергию первой реакции цикла. Тогда на нагревание Солнца останется энергия $4 \cdot 10^{-12}$ Дж от каждого протонного цикла.

В ядре Солнца возможны и другие ядерные реакции. В частности, может происходить синтез гелия с участием ядер углерода и азота в качестве катализаторов. Эти ядра переходят друг в друга, но в конечном итоге такого углеродного цикла образуется ядро гелия-4, а количество углерода и азота не из-

меняется. Таким образом, по выходу тепловой энергии углеродный цикл эквивалентен протонному.

Углерод, а затем кислород и более тяжелые элементы образуются в звездах в результате реакций $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$; $^4\text{He} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O}$ и т. д.

Однако в недрах Солнца температура недостаточно высока, поэтому скорость протекания этих реакций там ничтожна. Откуда же тогда взялись на Солнце тяжелые элементы? На нем даже свинца вполне заметное количество. Заметьте, образование элементов тяжелее железа ^{56}Fe энергетически невыгодно: при образовании тяжелых элементов дефект масс меняет знак. Вспомните о радиоактивности, о самопроизвольном распаде элементов тяжелее урана. Ответ состоит в том, что Солнце — звезда второго поколения. По современным понятиям эволюция звезд протекает в два этапа. Сперва из дозвездного вещества, состоящего из трех четвертей водорода и четверти гелия по массе, образуются звезды первого поколения. Это массивные звезды, и реакции протонного цикла проходят в них довольно быстро. Наконец, в их центре водорода остается мало и горение приостанавливается. Звезда сжимается, давление и температура в ней резко возрастают и начинает «гореть» гелий. Это критический момент истории звезды. Если масса ее была достаточно большой, то синтез элементов на этой стадии проходит взрывообразно: вещество разогревается до температур в сотни миллионов градусов, проходят и энергетически невыгодные реакции синтеза тяжелых элементов, но сама звезда взрывается. При этом и водород, и тяжелые элементы рассеиваются во Вселенной.

Обратите внимание, что при реакциях, объединяющих ядра гелия, образуются элементы с четными зарядами ядер. Вообще ядерные объединения четного числа протонов и четного числа нейтронов устойчивее при звездных температурах. Поэтому и распространенность в космосе элементов с четными номерами окажется на порядок выше, чем нечетных элементов (взгляните еще раз на рис. 25).

После взрыва звезды первого поколения вещество, обогащенное малыми примесями практически всех элементов, может снова под действием

гравитационного притяжения собраться в звезды. Это и будут звезды второго поколения. Таково и наше Солнце.

Взрыв звезды первого поколения, выбросивший вещество, из которого образовалась наша Солнечная система, произошел около 5 миллиардов лет назад. Большинство звезд Галактики, как и Солнце, звезды уже второго поколения. Есть, однако, в ней и водородно-гелиевые звезды, еще не успевшие в своем развитии дойти до взрыва. Взрыв звезды, впрочем, событие редкое. Сейчас мы убедимся, что для него нужны особые условия. При нормальном горении звезды стабильны. Итак, постараемся ответить на вопрос:

4. Может ли Солнце взорваться?

Источник звездной энергии — ядерные реакции, реакции синтеза гелия из водорода и синтеза остальных элементов из этих двух самых легких. Но водорода ведь и на Земле немало, весь наш океан состоит из воды, а в каждой ее молекуле два атома водорода. Может быть, и в земном океане медленно, незаметно идут те же реакции протон-протонного цикла?

Нет. Оказывается, можно определенно утверждать, что во всем океане за миллиарды лет его существования не прошло ни одного слияния двух протонов в дейтерий. Отчего же на Солнце и звездах ядерные реакции идут, а на планетах нет?

Не будем спешить с ответом. Посмотрим сперва, как часто вступает в реакцию синтеза солнечный водород. Светимость, световая мощность Солнца нам известна: $L_{\odot} \sim 4 \cdot 10^{26}$ Вт обеспечивает ее синтез гелия, а при образовании одного атома гелия выделяется энергия $E \sim 4 \cdot 10^{-12}$ Дж. Поделив одно на другое, можно узнать, сколько атомов гелия образуется на Солнце за одну секунду:

$$\dot{N}_{\text{He}} \sim \frac{L_{\odot}}{E} \sim 10^{38} \text{ с}^{-1}.$$

(Буквой с точкой над ней принято обозначать скорость изменения величины, ее производную по времени.) Конечно, это число можно было бы вычислить и поточнее, но сейчас высокая точность нам не понадобится. Итак, за секунду «сгорает» $4 \cdot 10^{38}$ ядер

водорода, протонов, образуется 10^{38} ядер гелия и $2 \cdot 10^{38}$ нейтрино. Нейтрино уносят мощность, примерно равную $0,1L_{\odot}$. Таким образом, ядерные реакции обеспечивают солнечную мощность $1,1L_{\odot}$. При этом каждую секунду Солнце «худеет» на $1,1L_{\odot}/c^2 \simeq 4,5 \cdot 10^9$ кг. Много? Но ведь и Солнце огромно.

Посмотрим теперь, как часто «доводится умирать» одному атому водорода на Солнце, какова вероятность его гибели за одну секунду. Будем для оценки считать, что Солнце только из водорода и состоит; тогда по порядку величины Солнце объединяет $N_H \sim m_{\odot}/m_H \sim 10^{57}$ атомов водорода. Поэтому за секунду выгорает только $4 \cdot 10^{-19}$ доля солнечного горючего, только 2 протона из каждых $5 \cdot 10^{18}$ вступают в реакцию за одну секунду. С такими темпами и за 10 миллиардов лет, за время, сравнимое с возрастом Вселенной, не успеет сгореть и десятая часть солнечного водорода. Энергетический кризис нашей звезде пока не угрожает. Медленность горения объясняет и тот факт, что Солнце, имея возраст около 5 миллиардов лет, может считаться еще молодой, полной водородной энергией звездой.

Мы подсчитали вероятность вступления протона в реакцию за одну секунду. А теперь попробуем оценить, чему равна вероятность слияния двух протонов при одном столкновении. Для этого нужно узнать, сколько раз в секунду сталкивается с другими один протон. Будем считать очень грубо, что протоны — шарики радиуса $r_0 \sim 3 \cdot 10^{-15}$ м. В центральных областях Солнца при температуре $T_c \sim 10^7$ К они движутся со скоростями $v \sim \sqrt{kT_c/m_H} \sim 3 \cdot 10^5$ м/с, а в каждом кубическом метре их находится $n \sim \rho_c/m_H \sim 10^{32}$ штук. Каждый протон за секунду столкнется со всеми протонами в цилиндре с основанием πr_0^2 и высотой v . Всего в этом цилиндре находится $\pi r_0^2 v n \sim 10^9$ протонов. Вот и оказывается, что каждый протон сталкивается с другими 10^9 раз в секунду, а в реакцию-то вступает в среднем только один раз за $2,5 \cdot 10^{18}$ секунд. Выходит, что вероятность ядерной реакции $p + p \rightarrow d$ при одном столкновении имеет порядок величины всего лишь 10^{-28} . И это при самых экстремальных условиях, в самом центре Солнца! Что уж тут ожидать от земного океана.

Отчего же так мала эта вероятность? Вспомним, протоны имеют одинаковые электрические заряды, поэтому они отталкиваются. Только на самых малых расстояниях порядка r_0 выигрыш энергии от дефекта массы, от ядерного притяжения, сравнивается с потерей энергии при сближении протонов. Кинетическая энергия протона в центре Солнца $kT_c \sim 10^{-16}$ Дж, но чтобы сблизиться на расстояние r_0 , протонам нужно затратить энергию $e^2/r_0 \sim 10^{-13}$ Дж, т. е. на три порядка большую. Хотя в газе с температурой T всегда найдутся и частицы с энергиями, существенно большими kT , но число таких частиц очень быстро, пропорционально $e^{-E/kT}$, падает с ростом энергии E . Таким образом, вероятность отыскать частицу с энергией, уже в 300 раз большей, чем kT , оказалась бы порядка $e^{-300} \sim 10^{-130}$. Число это так мало, что его, безусловно, можно положить равным нулю.

Если бы ядерная реакция происходила именно так, механически, то дело обстояло бы совсем плохо, ядерный синтез не проходил бы вообще. Природа, однако, предусмотрела иную возможность. Оказывается, чтобы вступить в реакцию слияния, протонам не обязательно подниматься на энергетическую «горку» высотой в e^2/r_0 , они могут просочиться под «горой», в результате туннельного эффекта. Проход частиц под энергетическим барьером допускает квантовая механика.

Пусть сталкиваются два протона, имеющие кинетическую энергию $E \sim m_H v^2 \sim kT$. На больших расстояниях потенциальная энергия их взаимодействия — электростатическая, $U = e^2/r$. Однако на расстояниях порядка r_0 ядерные силы притяжения становятся больше электрических, поэтому потенциал $U(r)$ на малых расстояниях имеет «яму» глубиной, пропорциональной дефекту масс реакции (рис. 27). Согласно классической механике при таком потенциале частицы не могут подойти друг к другу ближе, чем на расстояние $r_{\min} = e^2/E$. Электрическая «пружина» разжимается и протоны расходятся снова. Так в большинстве случаев столкновение и происходит — протоны упруго отскакивают друг от друга.

Однако при температуре в десяток миллионов градусов это расстояние порядка $r \sim e^2/kT \sim 10^{-12}$ м.

Оно на три порядка больше размера ядра r_0 , но уже достаточно мало для того, чтобы движение частиц подчинялось не классической механике, а квантовой.

Оказывается, движение частиц в пределах таких малых размеров нельзя описывать абсолютно подробно. При квантовом движении нельзя определенно утверждать, где именно находится частица и какова при этом ее скорость. Это означает, что вероятности отдельных событий вычислить можно, но конкретно

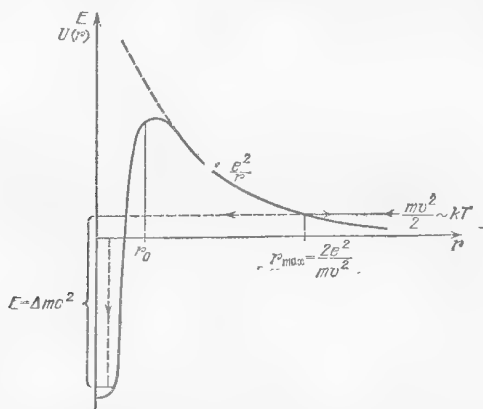


Рис. 27. Потенциальная энергия сближающихся протонов.

предсказать, какое именно из них случится с отдельной элементарной частицей, нельзя. Но в данном случае нас как раз и интересует вероятность слияния двух протонов ω , вероятность образования дейтерия, а вовсе не судьба отдельного протона.

Исходя из реальной светимости Солнца, мы оценили, что солнечный протон вступает в реакцию один раз за $2,5 \cdot 10^{18}$ секунд. Звучит это утверждение немного странно: ведь два раза протон реагировать не может. Заметьте однако, что и время это больше возраста Вселенной. Именно поэтому лучше выражать ту же мысль через понятие вероятности: вероятность реакции образования дейтерия равна величине, обратной этому времени, $\omega \sim 4 \cdot 10^{-19} \text{ с}^{-1}$. Размерность ω — обратное время, а смысл этой величины таков: за время t в реакцию вступит доля протонов, равная малому числу ωt .

Вероятность ядерной реакции ω зависит от средней плотности водорода и от средней энергии движения протонов, т. е. от температуры. Посмотрите на рис. 28. На нем изображена рассчитанная по законам квантовой механики зависимость вероятности ω от температуры при плотности вещества примерно такой же, что и в центре Солнца: 100 г/см^3 . Действительно, при температуре солнечных недр эта зави-

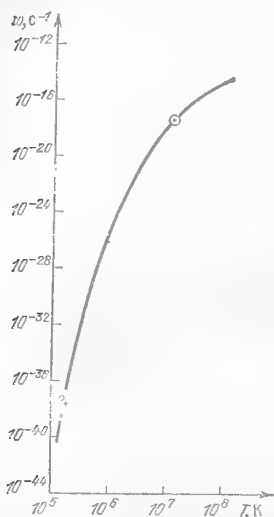


Рис. 28. Вероятность ядерной реакции образования дейтерия в зависимости от температуры.

симость дает значение ω , довольно близкое к полученному по светимости Солнца.

Если посмотреть, как быстро идут ядерные реакции в центре Юпитера, где температура порядка 10^5 K , то окажется, что вероятность реакции там порядка 10^{-38} с^{-1} . Это означает, что скорость ядерных реакций в недрах Юпитера на 18 лишним порядков уступает солнечной, и энерговыделение, вследствие ядерных реакций, на Юпитере ничтожно мало, даже по сравнению с попадающей на него энергией солнечного света. Тем более справедлив этот вывод для других планет, уступающих по размерам Юпи-

теру. В земном же океане термоядерные реакции естественного происхождения совершенно исключены.

Знание скорости ядерных реакций рождает новую загадку. Вы видите, скорость ядерной реакции очень быстро увеличивается с ростом температуры. Но такая ситуация встречается и для некоторых химических реакций. Например, при комнатной температуре в смеси водорода и кислорода реакция образования воды практически не происходит, а поднеси эту смесь к огню, и раздастся взрыв. Как он начинается? В месте запала нагрев небольшого объема приводит к ускорению реакции, а выделение энергии

ст нес еще больше разогревает смесь. Реакция моментально охватывает все доступное вещество — происходит взрыв.

Почему же Солнце не взрывается? Ведь кажется, что все это почти дословно может относиться и к нему! Допустим, в каком-то месте внутри Солнца температура оказалась чуть выше равновесной. Тогда в этом месте ядерные реакции пойдут более интенсивно, это приведет к еще более сильному местному перегреву, вовлекающему в быструю ядерную реакцию все более обширные прилегающие области солнечной плазмы. Теплоотвод с повышением температуры тоже возрастает, но не в такой степени — избыточное тепло не успеет излучиться. Что же получается? Малое температурное возмущение должно нарастать, оно неустойчиво. Такая неустойчивость, казалось бы, должна привести к взрыву — в интенсивную реакцию, сжигающую все ядерное горючее, будет вовлечена вся звезда.

Как уже говорилось, звезды иногда и взрываются. Все, что нас окружает, когда-то было веществом взорвавшейся звезды. Вспышки звезд наблюдаются и сейчас. Бывает, что какая-нибудь малозаметная звезда вдруг, за недели, становится очень яркой, увеличивает свою светимость в миллионы раз. Тогда астрономы называют эту звезду новой, а само отмеченное событие — вспышкой новой. После вспышки такая звезда медленно, за месяцы, возвращается к более или менее первоначальному состоянию.

Гораздо реже наблюдаются еще более грандиозные явления, получившие название вспышек сверхновых звезд. Последние замеченные вспышки сверхновых в нашей Галактике были в 1054, 1572 и в 1604 годах — имеются в виду, конечно, те годы, когда свет взрывов дошел до нас. Последние две вспышки оживили интерес человечества к астрономии, вскоре после этого был изобретен телескоп. Но вспышек сверхновых с тех пор в нашей Галактике, как назло, нет.

После взрыва сверхновой светимость тоже быстро спадает, но звезда уже теряет свой прежний облик. На месте вспыхнувшей сверхновой остается быстро вращающаяся нейтронная звезда, пульсар, а все остальное вещество с большой скоростью разлетается

от него. Нейтронные звезды размером всего лишь около 10 км по массе своей близки к Солнцу. Их гравитационное поле настолько велико, что под действием огромных давлений электроны всех атомов вдавливаются в ядра, протоны ядер превращаются в нейтроны.

Однако нашему светилу не грозит перспектива таких страшных превращений. В большинстве звезд термоядерные реакции протекают устойчиво. Нужны весьма особые условия для того, чтобы звезда взорвалась. Вот что обеспечивает устойчивость звезд. Если почему-либо в звезде выделяется лишняя энергия, то намного раньше, чем начнутся интенсивные ядерные превращения, в этом месте звезды успеет выровняться давление, а звезда в целом слегка расширится. Радиус звезды при этом увеличится. Температура звездных недр, как показывает формула, обратно пропорциональна радиусу звезды, поэтому она должна охладиться. Таким образом, выделение энергии, нагревание звезды, приводит к уменьшению ее температуры. Звезды как бы сами выбирают свой размер. Их светимость и радиус при одинаковом составе зависят только от их массы.

Основная причина, по которой работает этот механизм устойчивости звезд, это медленность ядерного горения и теплоотвода по сравнению с временем выравнивания давления. Давление, возмущенное какой-либо причиной, стремится принять равновесное значение со скоростью звука. Скорость звука примерно равна скорости теплового движения атомов $u \sim \sqrt{kT/m_H}$. Поэтому даже самые большие по размерам возмущения давления внутри Солнца успевают выровняться за время

$$\tau_1 \sim R_\odot/u \sim 25 \text{ мин.}$$

Характерное время теплоотвода энергии из центральных областей Солнца гораздо больше. Давайте оценим время, за которое энергия, выделяющаяся при ядерных реакциях, достигает поверхности Солнца. Допустим, в центре реакции прекратились, через какое время мы сможем заметить это по охлаждению поверхности? Удельная теплоемкость солнечной плазмы по порядку величины равна k/m_H . Поэтому полный запас тепловой энергии Солнца есть $E_T \sim$

$\sim m_{\odot} k T_c / m_H \sim 3 \cdot 10^{41}$ Дж. Разделив эту энергию на светимость, тепловую мощность Солнца, оценим время его теплового охлаждения

$$\tau_2 \sim \frac{E_{\tau}}{L_{\odot}} \sim 3 \cdot 10^{14} \text{ с} \sim 10^7 \text{ лет.}$$

Оказывается, Солнце и без ядерной энергии светило бы целую геологическую эпоху. Однако возраст Солнца, как известно, намного больше. Существенно больше и время выгорания солнечного водорода, оно не меньше, чем 10^{10} лет.

Гравитационная энергия Солнца по абсолютной величине оказывается того же порядка, что и его тепловая энергия E_{τ} . Силы тяготения — это силы притяжения, поэтому гравитационная энергия отрицательна. Для двух тел с массами m_1 и m_2 на расстоянии R она равна — Gm_1m_2/R . Чтобы точно подсчитать собственную гравитационную энергию Солнца, нужно учесть распределение плотности в нем, т. е. зависимость плотности от расстояния до центра. Но если интересоваться только порядком величины энергии гравитационного притяжения, то можно написать без численного коэффициента:

$$E_{\text{гр}} \sim - \frac{Gm_{\odot}^2}{R_{\odot}}.$$

Эта величина по модулю оказывается равной $4 \cdot 10^{41}$ Дж; она действительно того же порядка, что и тепловая энергия E_{τ} .

Из закона сохранения энергии следует, что уменьшение размера звезды приводит к выделению тепловой энергии. Физики прошлого века Кельвин и Гельмгольц считали, что именно гравитационная энергия переходит в излучение при сжатии звезд. О термоядерной энергии они не знали. Поэтому по их расчетам оказывалось, что возраст Солнца всего около 10 миллионов лет.

Однако роль гравитационной энергии в эволюции звезд тоже очень существенна. Уменьшение ее при сжатии разогревает вещество при образовании звезд вплоть до температур, при которых начинается ядерное горение водорода. В дальнейшем баланс тепловой и гравитационной энергий обеспечивает устойчивость звезд.

5. Поверхность Солнца

Когда физическая задача сложна? Тогда ли, когда объект ее сильно отличается от привычного масштаба? — Нет, недра Солнца устроены довольно просто. И в физике атомных масштабов тоже нетрудно разобраться. Задача становится сложной, когда в ней конкурируют несколько физических явлений сразу, когда параметры ее таковы, что ничем пренебречь нельзя.

Ситуация в физике была такой не всегда. Было время, когда не были известны основные законы природы — и целые классы явлений были сложны, необъяснимы. Сейчас же нам известны фундаментальные законы физики: теория гравитации, теория электромагнитных явлений, квантовая механика и статистика — теория систем из большого числа частиц. Фундаментальные пробелы есть только в физике частиц высоких энергий. Но и тут создается впечатление, что скоро наступит ясность.

Но может быть, найдутся и другие основные физические принципы? Может быть. Но не в разработанных уже разделах науки. Даже намечающееся объединение всех взаимодействий в единую схему не отменит завоеванных знаний. Разве что в биофизике удастся установить законы природы, лежащие вне перечисленных. Но однозначных, точно выявленных физических фактов для установления фундаментальных законов биологии, не являющихся следствием известных законов физики, пока недостаточно. В то же время необъясненных явлений вокруг нас все еще много. Отчего же?

Вот характерный пример. Попробуем разобраться, как устроено Солнце вблизи его поверхности. Мы можем наблюдать ее глазами и изучать приборами. Никто сейчас и под сомнение не ставит, что фундаментальные законы физики верны для солнечной поверхности — они и в глубине Солнца работают неплохо. И тем не менее, надежно объяснить удалось пока далеко не все, наблюдаемое на Солнце.

Посмотрите на фотографию участка солнечной поверхности, снятую через телескоп. Похоже, что рассыпан слой зерна (рис. 29). Эти образования так и называются — гранулы, по-латыни *granulus* — «зер-

нышко». Гранулы есть видимые проявления конвекции во внешнем слое Солнца. В центре гранул солнечная плазма поднимается, по краям опускается, охлажденная потерей энергии на излучение; из-за разности температур и возникает видимый контраст яркости. Размеры гранул от 200 до 1300 км; на солнечном диске их находится около миллиона. Невооруженным глазом гранулы не видны. Как и в случае

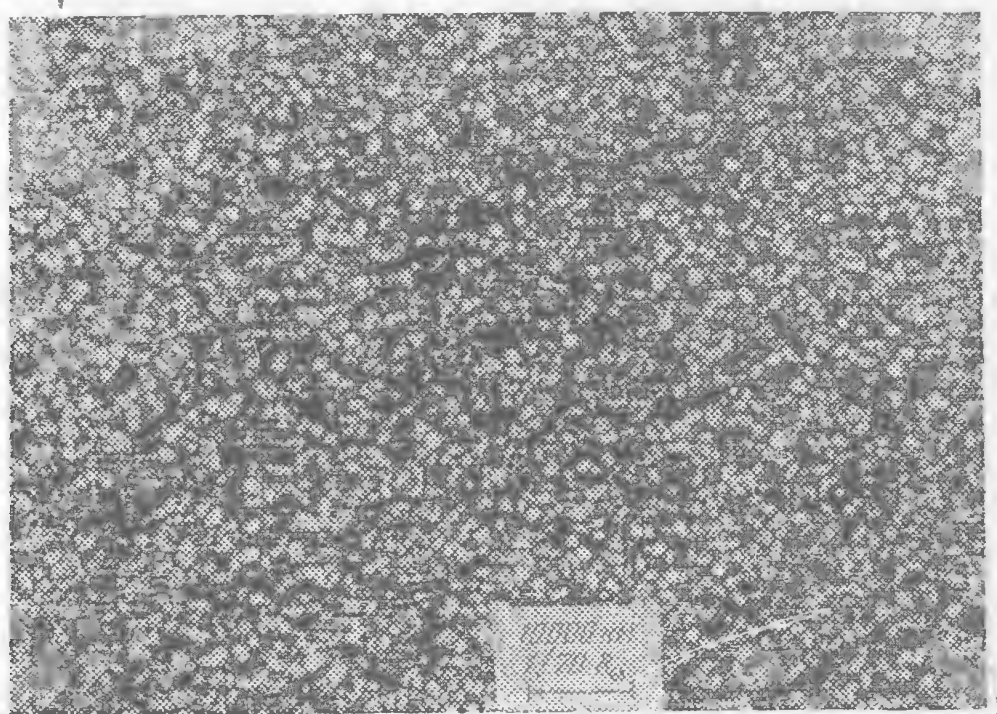


Рис. 29. Фотография солнечной поверхности, сделанная со стратостата (Пулковская обсерватория).

обычной конвекции, картина конвекции на Солнце нестационарна: отдельная гранула живет около 10 минут, затем граница ее расплывается и на ее месте возникают новые гранулы.

Чем физически выделена поверхность Солнца? — Тем, что мы ее видим, видим резкий край солнечного диска. Это означает, что именно на этом расстоянии от центра большая часть солнечной энергии, излучения, уже может навсегда покинуть светило. Уход излучения приводит к резкому охлаждению поверхности Солнца по сравнению с более глубокими слоями. Быстрое падение температуры вблизи поверхности приводит к очень быстрому убыванию с высотой плотности вещества. Все же она меняется не скачком, а плавно — резкой границы Солнце не имеет.

Температура вблизи поверхности Солнца достаточно низка для того, чтобы ионы водорода, гелия

и других элементов могли захватить электроны и превратиться в нейтральные атомы. Этот процесс не завершается полностью, свободных электронов и ионов остается еще достаточно много для высокой электропроводности среды. В то же время, в малой доле образуются даже простые молекулы. Газ солнечной поверхности поглощает излучение нижних, более горячих слоев, атомы возбуждаются и частично диссоциируют на электроны и ионы. Затем происходит рекомбинация или переход в невозбужденное состояние. При этом атомы излучают свет.

Вблизи солнечной поверхности излучение не успевает полностью достичь теплового равновесия, поскольку свет в конечном итоге покидает Солнце. Поэтому солнечный спектр не точно совпадает со спектром равновесного теплового излучения.

Атомы каждого элемента испускают большую часть света в частотах, характерных только для этого элемента. Набор этих частот, несколько сот узких линий при известных длинах волн, есть спектр элемента. Холодные, невозбужденные атомы, наоборот, сильно поглощают излучение в частотах своего спектра. Непосредственно над видимой поверхностью Солнца газ относительно холодный. Выборочное поглощение света атомами этого холодного газа приводит к тому, что в солнечном спектре есть множество (около двадцати тысяч) узких провалов — темных линий Фраунгофера, образованных всеми веществами солнечной атмосферы.

Спектральный анализ позволяет узнать очень многое о солнечной поверхности. По длинам волн и интенсивностям фраунгоферовых линий устанавливается химический состав газа. По ширине этих линий можно судить о температуре поглощающей среды. Малое смещение линий из-за эффекта Доплера позволяет узнать скорости движения газа. Наконец, по расщеплению линий и поляризации излучения находится величина магнитного поля в разных местах солнечной поверхности. Конвекция ионизованного газа в магнитном поле намного сложнее обычной, поскольку возникающие при этом электрические токи сами порождают магнитные поля.

Солнце вращается. Это вращение происходит в прямом направлении, т. е. в направлении, совпадаю-

щем с обращением планет. Ось вращения Солнца, однако, не точно перпендикулярна эклиптике, а составляет с нормалью к ней угол, равный $7^{\circ}15'$. Между 7 июня и 7 декабря мы с Земли можем видеть Северный полюс Солнца, остальные полгода — Южный.

О вращении Солнца мы судим по регулярному перемещению деталей его поверхности. Однако этот газовый шар вращается не как единое твердое тело, не как Земля: точка на экваторе солнечной поверхности совершает оборот за 25 суток, а вблизи полюсов период вращения около 35 суток. Такое неоднородное вращение называют дифференциальным в отличие от твердотельного, при котором угловая скорость всех точек одинакова. Вглубь угловая скорость вращения Солнца тоже изменяется, но как именно, нам с полной достоверностью неизвестно. Ясно одно: конвекция на Солнце, его магнитные поля и дифференциальное вращение связаны, взаимодействуют между собой.

Уже сложно? Но это далеко не все. Вот еще одно совпадение физических величин, которое может привести к объяснению солнечных явлений. Оценим скорости электронов вблизи поверхности Солнца:

$$v_e \sim \sqrt{\frac{kT_{\odot}}{m_e}} \sim 3 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

Вторая космическая скорость на поверхности Солнца, скорость частицы, достаточная для ее убегания в космос, равна

$$v_2 = \sqrt{\frac{2Gm_{\odot}}{R_{\odot}}} = 6,18 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

Порядок величин этих двух скоростей совпадает. Это означает, что значительная доля электронов Солнца могла бы покинуть его поверхность как свет. Но тогда Солнце станет заряжено положительно — ведь скорости положительных ионов существенно меньше. Электроны при этом будут удерживаться не только гравитационным, но и электрическим полем Солнца. Оценить величину равновесного положительного заряда Солнца можно из тех соображений, что энергия электростатического притяжения должна быть порядка кинетической энергии электронов

(а она, в свою очередь, порядка гравитационной энергии электрона):

$$\frac{eQ}{R_{\odot}} \sim kT_{\odot} \sim G \frac{m_e m_{\odot}}{R_{\odot}}$$

Отсюда электрический заряд Солнца равен

$$Q \sim \frac{G m_e m_{\odot}}{e} \sim 2,5 \cdot 10^8 \text{ абс. ед} \sim 0,08 \text{ Кл.}$$

Величина эта, скажем прямо, ничтожная. Много электронов с Солнца не убежало, от силы один из каждых 10^{39} . Да и само существование положительного заряда Солнца — факт чисто умозрительный, не подтвержденный даже косвенными измерениями. Тут, скорее, важна возможность зарядовой неустойчивости солнечной поверхности. Может быть, нестационарными потоками электронов можно будет объяснить какое-либо из явлений, наблюдаемых на поверхности Солнца. А явлений этих немало.

«Кроме гранул, супергранул и спикул *), свойственных нормальной (невозмущенной) солнечной атмосфере, в последней наблюдается также ряд „возмущений“, т. е. неоднородностей с относительно короткими временами жизни. Главные из них — это пятна, факелы, хромосферные вспышки, протуберанцы **), корональные лучи и дыры». Это цитата из научной статьи, посвященной гидродинамике Солнца. Невольно вспоминается «Солярис» Станислава Лема, описание проявлений живого океана фантастической планеты: «Никакие термины не воспроизводят того, что делается на Солярисе. Его „древогоры“, „длиннуши“, „грибища“, „мимойды“, „симметриады“ и „асимметриады“, „позвоночники“ и „быстренники“ звучат страшно искусственно, но дают некоторое представление о Солярисе даже тем, кто кроме неясных фотографий и чрезвычайно несовершенных фильмов ничего не видел». Аналогия подчеркнута Лемом и названием планеты: Солярис — очевидное производное латинского имени Солнца, Sol; Solaris — это солнечный.

Фактический материал, известный об атмосфере Солнца и отдельных явлениях в ней, довольно велик. Большая часть его, однако, остается за пределами

*) Латинское *spiculum* — «иголка», «острие», «жало».

**) *Protuberare* — по-латыни «вздвигаться».

этой книги потому, что сеть причинных связей, его охватывающая, пока еще редка. Вот как устроена атмосфера Солнца в самых основных чертах.

То, что мы называем видимой поверхностью Солнца, есть понятие условное, ведь свет разной длины волны покидает светило с разных, но близких друг другу глубин. Область, в которой рождается видимое излучение Солнца, называется фотосферой — от греческого «фотос» — «свет». В фотосфере температура падает с подъемом к поверхности. Минимум температуры газа, равный 4200 К, соответствует высоте примерно 200 км над поверхностью.

Далее температура газа солнечной атмосферы начинает медленно расти. На высоте 10^4 км — это семидесятая доля радиуса — температура равна уже 300 000 К. Область от фотосферы до этой высоты называют хромосферой *). Еще более высока температура короны Солнца, — она достигает полутора миллионов кельвинов. Корона создает неправильной и непостоянной формы ореол, наблюдаемый вокруг Солнца при полных солнечных затмениях. Отдельные лучи короны простираются на полтора-два радиуса Солнца. Вид и протяженность солнечной короны меняется очень сильно.

Но отчего в атмосфере Солнца температура возрастает с высотой? Ведь на первый взгляд с удалением от поверхности светила и температура должна бы уменьшаться.

Надо сказать, что с полным правом употреблять слово «температура» для газа хромосферы и короны нельзя. Температура есть характеристика равновесного или близкого к равновесию газа, скорости движения в котором гораздо меньше скорости звука. Плазма короны, однако, весьма далека от равновесия. Поэтому температуры, указанные для хромосферы и короны, — это лишь характерные энергии электронов в привычном температурном масштабе.

Отчего средняя кинетическая энергия частиц, и электронов, и протонов, растет с удалением от поверхности Солнца, ясно не до конца. Принятая сейчас точка зрения состоит в том, что разогревает корону шум конвекции, — звуковые волны, приходящие в

*) «Хромос» — по-гречески «цвет».

верхнюю атмосферу Солнца с того уровня, где освобождается световая энергия. Это представление, однако, отнюдь не свободно от критики и принимается за неимением других.

В короне рождается солнечный ветер. Вторая космическая скорость $v_2 = \sqrt{2Gm_{\odot}/r}$ уменьшается с удалением от Солнца. Она равна тремстам километрам в секунду уже на расстоянии $r = 4R_{\odot}$. А средняя скорость частиц при температуре короны в полтора миллиона градусов порядка 100 км/с, и немало протонов имеют втрое большие скорости. Поэтому там скорости многих частиц плазмы достаточны для убегания. В то же время, плотность плазмы быстро убывает с удалением от Солнца. Начиная с расстояния в 2—3 радиуса Солнца, столкновения между частицами становятся настолько редкими, что эти частицы могут без помех покинуть Солнце, устремиться в космическое пространство. Это и есть солнечный ветер.

Наглядное проявление его — возникающие при обдувании им ядер комет хвосты — известно с глубокой древности. Однако до непосредственного обнаружения солнечного ветра космическими кораблями была лишь гипотеза о существовании потока заряженных частиц, исходящего от Солнца. На расстоянии орбиты Земли $a_{\oplus}$ средняя плотность солнечного ветра $n = 5$ частиц в кубическом сантиметре, средняя скорость его $v = 320$ км/с.

Оценим, какую массу ежесекундно теряет Солнце за счет солнечного ветра. Это есть плотность массы $0,5 \text{ } nm_{\text{H}}$, умноженная на скорость v и на поверхность сферы $4\pi a_{\oplus}^2$ с радиусом земной орбиты:

$$-\dot{m}_{\odot} \simeq 2\pi a_{\oplus}^2 nm_{\text{H}} v \simeq 4 \cdot 10^8 \text{ кг/с.}$$

Интересно, что эта величина только на порядок меньше потери Солнцем массы из-за дефекта масс при ядерных реакциях: $4,5 \cdot 10^9$ кг/с. Еще одна случайная близость порядков величин, однако, не имеющая, по видимому, физических следствий.

И интенсивность солнечного ветра, и величина короны сильно изменяются в зависимости от солнечной активности. Другим наглядным проявлением этой переменчивости состояния верхних слоев Солнца могут служить пятна. Чем больше пятен на Солнце и

чем крупнее они, тем дальше простирается солнечная корона и тем интенсивнее солнечный ветер.

Большие пятна на Солнце можно наблюдать даже невооруженным глазом. Их появление отмечено еще в древних китайских хрониках. История подлинно научного изучения солнечных пятен началась с изобретением телескопа. В 1611 году солнечные пятна были описаны сразу несколькими европейскими учеными, среди которых был и Галилей.

С тех пор установлен ряд важных закономерностей солнечной активности. К середине прошлого века было замечено, что число пятен на Солнце меняется почти периодически, причем период этого изменения составляет примерно 11 лет. Такая изменчивость солнечной активности продолжается до сих пор. Известно, что солнечные пятна всегда сопровождаются факелами вблизи них. Измерены магнитные поля в солнечных пятнах — по величине они могут в тысячу раз превышать магнитные поля вне пятен. Известно, что структура полярности магнитного поля в пятнах меняется с периодом в 22 года, в два раза большим, чем период числа пятен. Открыты и многие другие закономерности.

К сожалению, большая часть наших знаний о солнечной активности имеет описательный характер. Взаимосвязь некоторых из наблюдаемых явлений поддается объяснению, однако полной теории солнечной активности сегодня еще нет. Нет даже общепризнанной теории на качественном уровне с численными оценками. Такая первичная теория должна в аргументированной оценке получить величину периода солнечной активности порядка десятка лет. Увы, сделать это еще не удалось.

В сложившейся ситуации у людей возникает стремление обобщать наблюдения двух последних столетий на более длительные периоды. Насколько неоправдана такая экстраполяция в отношении солнечной активности, показывает следующий пример. С 1645 по 1715 год пятен на Солнце почти не было вовсе! До 1645 года солнечный цикл не отличался одиннадцатилетней регулярностью. Когда в 1890 году эти факты были извлечены из старых публикаций директором Гринвичской обсерватории Э. Маундером, они просто не вызвали доверия. Гораздо логичнее

казалось объяснить отсутствие наблюдений солнечных пятен случайностью, нерегулярными исследованиями, чем поверить в действительное выключение солнечного цикла. И все же трудно сомневаться в том, что этот 70-летний перерыв солнечной активности, называемый минимумом Маундера, действительно существовал.

Он подтверждается и реакцией европейских ученых, считавших появление отдельных пятен в это время экстраординарными событиями, и малым числом наблюдений в эти годы полярных сияний, которые возникают от всплесков интенсивности солнечного ветра. Наконец, в годичных кольцах деревьев, приходящихся на 1650—1720 годы, обнаруживается возрастание на 10% содержания радиоактивного углерода ^{14}C . Небольшая доля этого изотопа образуется из обычного углерода ^{12}C , входящего в углекислый газ, в верхних слоях атмосферы Земли под действием космических лучей. Затем ^{14}C усваивается растительностью при фотосинтезе. Радиоактивный углерод ^{14}C медленно, с периодом полураспада 5570 лет, распадается, переходя в обычный азот ^{14}N . Концентрация ^{14}C позволяет археологам довольно точно датировать деревянные изделия.

Космические лучи — это поток частиц высоких энергий, со всех сторон падающий на Землю. Ядерные реакции в высоких слоях атмосферы вызваны космическими лучами отнюдь не солнечного, а галактического происхождения. И тем не менее, интенсивность этих космических лучей связана с солнечной активностью: чем больше пятен на Солнце, тем слабее поток космических лучей. Эта связь осуществляется солнечным ветром.

Солнечный ветер на расстоянии порядка 10^{13} м, т. е. на расстоянии примерно полусотни радиусов земной орбиты, сжимает силовые линии галактических магнитных полей. Космические лучи распространяются в основном вдоль магнитного поля. Только наиболее энергичные частицы космических лучей Галактики могут проникнуть в глубь этого магнитного пузыря вокруг Солнца. Расстояние до его границы солнечный ветер проходит за полгода-год. При спокойном Солнце солнечный ветер слабее, граница солнечной магнитосферы придвигается ближе и стано-

вится менее плотной. В результате растет интенсивность космических лучей, достигающих Земли, и доля ^{14}C в атмосферной углекислоте.

За годы спокойного Солнца в обычном 11-летнем цикле не успевает накопиться достаточно избыточного радиоактивного углерода, чтобы по годичным слоям деревьев можно было заметить разницу с годами активного Солнца. Однако за 70 лет минимума Маундера разница стала вполне заметной.

Тепловое излучение Солнца постоянно. Солнечная активность изменяет только коротковолновую, нетепловую часть излучения при длинах волн, меньших 100 нм. На рис. 24 виден второй, меньший максимум. На эту область, однако, приходится менее 1% всей светимости Солнца. Как вскоре мы увидим, коротковолновая часть солнечного излучения не проникает через верхние слои земной атмосферы. Поэтому солнечная активность практически не меняет тепловой поток, приходящий к нашей планете, почти не сказывается на погоде Земли. Переменное коротковолновое излучение Солнца существенно изменяет состояние только самой внешней оболочки земной атмосферы.

В понимании физических причин солнечной активности и других феноменов атмосферы Солнца, к сожалению, еще далеко нет полной ясности. А воздействие Солнца на окружающий нас мир огромно. О небольшой его доле, о тепловом влиянии Солнца на Землю, мы еще расскажем. А теперь — слово поэту:

О солнце, ты — живот и красота природы,
Источник вечности и образ божества!
Тобой жива земля, жив воздух, живы воды,
Душа времен и вещества!

Александр Сумароков, 1760 г.

АТМОСФЕРА И ОКЕАН

1. Состав атмосферы

Взгляните на небесную лазурь — это атмосфера Земли, вдохните воздух полной грудью — это тоже она. Но что такое атмосфера с точки зрения физики? Чем определяется ее состав, ее давление и температура на разных высотах? Что является причиной ее движения, причиной ветров? Как ветры порождают океанские течения? Попробуем кратко ответить на эти вопросы.

Вы знаете, что атмосфера Земли состоит на 78% из азота, на 21% из кислорода и на 1% из аргона. Есть в ней еще малые примеси углекислого газа, паров воды и совсем ничтожные количества неона, гелия, криптона и водорода. Но попробуем понять, почему верхняя оболочка нашей планеты состоит именно из этих газов и воды мирового океана. Ведь атмосферы других планет Солнечной системы совершенно иные, и океана в привычном нам понимании на других планетах нет. На Венере и Марсе преобладает углекислый газ, на планетах-гигантах — гелий, водород, метан и аммиак. А на Луне и Меркурии атмосферы вовсе нет. Почему?

Состав атмосферы определяется, прежде всего, геологической историей планеты. У планет земной группы, образовавшихся при слипании малых твердых частиц, сначала, по-видимому, атмосфер не было совсем. Первичное вещество планет сжималось силами тяготения, они принимали форму шара, при этом недра планет разогревались. Под действием высоких температур и давления в первичном веществе происходили химические реакции. При этом более тяжелые продукты реакций опускались вниз, составляя ядро, более легкие образовали наружную твердь планет, кору, а газообразные продукты реакций со-

здали первую атмосферу. В земной атмосфере оказалось так много паров воды, что большая часть их сконденсировалась. Так появился первичный океан.

Не надо думать, что все это произошло раз и навсегда в далеком прошлом. На Земле этот процесс продолжается и сейчас, хотя и не так интенсивно, как в начале эволюции. И ныне обновляется земная кора, а вулканы планеты выбрасывают в атмосферу немалые количества паров воды и углекислоты. А кроме них, еще и сернистый газ, хлористый водород и другие малоприятные газы. Почему же их нет в нормальной атмосфере?

Ответ почти очевиден. Все газы атмосферы должны находиться в химическом равновесии и друг с другом, и с океаном, и с веществом земных пород. Поэтому кислотные окислы, выброшенные вулканами, очень быстро растворяются в океане, образуя кислоты. Эти кислоты, взаимодействуя с основными окислами земной коры, образуют соли. Растворимые соли растворены в океане, нерастворимые составляют осадочные породы.

Внимательный читатель, наверное, уже заметил слабое место этих рассуждений. Кислород! Его нет в вулканических газах, его нет и в атмосферах других планет.

Главный источник кислорода Земли — растительность. Хлорофилл растений под действием солнечных лучей перерабатывает углекислоту. Ее углерод входит в органические соединения растений, а кислород поступает в атмосферу. Есть, однако, и другой источник кислорода нашей планеты. Чтобы понять, как он действует, нужно сначала разобраться с вопросом: а что же удерживает атмосферы планет, почему их газы не улетучиваются в космос?

Давление воздуха у поверхности Земли, как известно, равно $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па. Это означает, что на всю поверхность Земли площадью $4\pi R_\oplus^2$ действует суммарная сила $4\pi R_\oplus^2 p_0$. Первоисточником этой силы является, естественно, притяжение. По второму закону Ньютона эта сила равна массе земной атмосферы, умноженной на ускорение свободного падения g . Отсюда нетрудно вычислить массу атмосферы

Земли:

$$m_A = \frac{4\pi R_{\oplus}^2 p_0}{g} = 5,3 \cdot 10^{18} \text{ кг.}$$

Она составляет, как видите, почти миллионную долю всей массы Земли. Еще интересно сравнить массу атмосферы с массой воды на нашей планете: 98% воды находится в океанах, 2% содержат ледники, в основном, Антарктиды и Гренландии, масса же пресноводных водоемов и водяных паров относительно мала. А всего воды на Земле $1,4 \cdot 10^{21}$ кг, т. е. ее масса в 266 раз превосходит массу атмосферы.

Ускорение земного тяготения не только создает давление атмосферы у поверхности. Оно же препятствует диссипации — разлету атмосферных газов в космическое пространство. Давайте сравним скорости молекул разных газов при температуре, скажем 300 К, со второй космической скоростью Земли $v_2 = \sqrt{2gR_{\oplus}} = 11,2$ км/с. Ясно, что если тепловая скорость молекул газа $v \sim \sqrt{kT/m}$ окажется близкой ко второй космической скорости, то этот газ в атмосфере не удержится. Оказывается, тепловая скорость молекул водорода равна 1,1 км/с, молекул гелия — 0,8 км/с, средняя скорость молекул азота и кислорода близка к 0,3 км/с.

На первый взгляд, все в порядке. Скорости газов оказались меньше второй космической скорости. Это означает, что Земля может удерживать в своей атмосфере любой газ. На самом деле газы атмосферы все же улетучиваются в космос, только очень медленно. Происходит это потому, что в высоких слоях атмосферы температура, как мы вскоре узнаем, намного выше, чем у поверхности, она достигает 1200 К. Это означает, что скорости молекул там в два раза больше, чем по сделанным оценкам. К тому же были оценены только средние скорости молекул. С такими скоростями при тепловом равновесии движется подавляющее большинство молекул. Однако малая их доля имеет скорости, значительно превышающее средние. Эти быстрые молекулы могут навсегда покинуть Землю.

Вы видели, что при одинаковой температуре наибольшие скорости имеют молекулы водорода и гелия, газов с наименьшей молярной массой. Посмотрите на

рис. 30. На нем изображены массы различных газов земного воздуха и масса всей воды на Земле в зависимости от их молекулярной массы. Видите, большинство точек близки к кривой, имеющей максимум при молекулярной массе воды. Относительное содержание разных элементов на Земле зависит прежде всего от того, сколько их образуется при ядерных

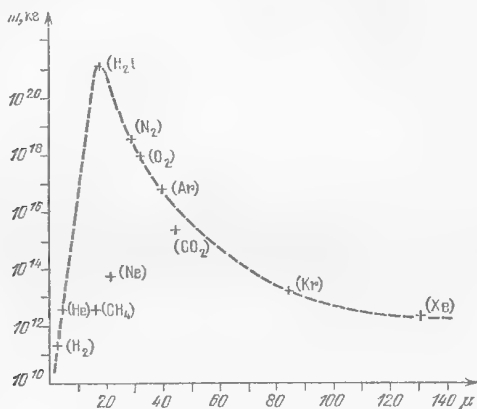


Рис. 30. Массы газов земной атмосферы и воды океана в зависимости от их молекулярной массы.

реакциях в звездах. Поэтому рис. 30 нужно сравнивать с рис. 25, где изображена космическая распространенность элементов. Вы видите, гелия в атмосфере Земли очень мало, а на Солнце и планетах-гигантах он составляет четверть их массы. Причина этого в том, что сила земного притяжения все же недостаточна для прочного удержания гелия и водорода.

Эти газы и по плотности легче остальных — в атмосфере они стремятся подняться вверх. Оказывается, земная атмосфера имеет однородный состав, хорошо перемешана только ниже 90 км. Эта часть ее называется гомосферой. Выше лежит гетеросфера — часть земной атмосферы с переменным составом. Концентрации гелия и водорода в гетеросфере нарастают с высотой. Выше 700 км атмосфера Земли состоит практически только из этих газов. В основном, только водород и гелий и улетучиваются в космос.

В гомосфере, однако, концентрации гелия и водорода очень малы. Откуда же они берутся в гетеросфере? Казалось бы, их количество должно непрерывно убывать, ведь они улетучиваются.

Оказывается, есть процессы, поддерживающие содержание этих легких газов в атмосфере. Гелий образуется в земной коре при распаде тяжелых радиоактивных элементов. А водород верхней атмосферы образуется из воды! Под действием ультрафиолетовой части излучения Солнца молекулы H_2O на высотах 30—50 км распадаются на водород и кислород. Таким образом, улетучивание водорода в космос приводит к убыли воды на Земле и к возрастанию содержания кислорода в атмосфере.

Каждую секунду из атмосферы в космос улетает примерно 1 кг водорода. Много это или мало? Прикинем, надолго ли хватит воды в океане и ледниках планеты. 1 кг водорода содержится в 9 кг воды. Разделим массу океана на эту скорость убывания — окажется, что земной воды хватит на $1,5 \cdot 10^{20}$ с или на 5000 миллиардов лет. Океан, таким образом, можно считать неисчерпаемым, ведь возраст Земли — «всего» 4,5 миллиарда лет.

А теперь оценим, сколько за время существования Земли образовалось кислорода. Это будет очень грубая оценка — нельзя на самом деле считать, что Солнце все это время светило так же, как сейчас. Но попробуем: 8 кг в секунду за 4 миллиарда лет даст нам 10^{18} кг кислорода — как раз столько, сколько его в нашей атмосфере и содержится, пятую часть массы атмосферы.

Не нужно переоценивать это совпадение. Ведь гораздо больше, чем его содержится в атмосфере, потребовалось кислорода для того, чтобы привести к современному состоянию химическое равновесие Земли — чтобы окислить метан и аммиак первичной атмосферы, чтобы окислить все породы земной коры. Без растений это было бы невозможно. Они производят по порядку величины 10^{14} кг кислорода в год или $3 \cdot 10^6$ кг в секунду. Это намного больше, чем дает диссипация водорода в космос. Однако содержание кислорода в атмосфере сейчас не увеличивается — весь кислород, создаваемый растениями, расходуется

на дыхание животных, окисление вулканических газов, горение и гниение мертвых растений.

Диссипация газов в космос качественно определяет состав и массы атмосфер и других планет Солнечной системы. Однако чтобы понять причину разнообразия их атмосфер, нужно прежде научиться определять температуры планетных атмосфер.

2. Тепловое равновесие планет.

Их атмосферы и океаны

Поверхности планет и их атмосферы согревает солнечное излучение. Солнечный шар, раскаленный термоядерными реакциями, излучает равномерно во все стороны световую мощность $L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26}$ Вт. Какая доля ее попадает на Землю? Эта часть, как легко понять, равна отношению площади земного диска $\pi R_{\oplus}^2$ к поверхности $4\pi a_{\oplus}^2$ сферы с радиусом земной орбиты $a_{\oplus}$. На Землю попадает лишь половина миллиардной доли всего солнечного излучения. Эта доля, умноженная на светимость Солнца $L_{\odot}$, и дает световую мощность, приходящую к нашей планете:

$$P = L_{\odot} \frac{R_{\oplus}^2}{4a_{\oplus}^2} = 1,75 \cdot 10^{17} \text{ Вт.}$$

Куда расходуется эта мощность? Часть ее непосредственно отражается Землей в космос. Остальные планеты и Луна видны на звездном небе именно благодаря отраженному свету. Точно так же, удалясь в космос, можно видеть и свет, отраженный Землей. По цвету он не совпадает со спектром источника, Солнца, потому что красные лучи атмосфера Земли и океан поглощают лучше, чем синие. Оттого в целом наша планета из космоса выглядит голубой.

Доля отраженной световой энергии называется «альбедо» и обозначается A . Это латинское слово происходит от *albus* — белый. Альбедо — это как бы степень белизны. Точность, с которой нам известно альбедо нашей собственной планеты, до последнего времени была невелика. Считалось, что Земля отражает в космос от 30 до 40% падающего на нее света. Последние измерения со спутников дали значение альбедо, равное 28%.

Куда же девается остальная энергия, $P(1 - A)$? Ясно, что именно она и является причиной того, что на нашей планете тепло по сравнению с космосом. Но ведь солнечное излучение поступает к Земле постоянно, и, если бы никакого отвода энергии не было, то температура на Земле постоянно росла бы и очень быстро. Следовательно, теплоотвод существует. Легко догадаться, что осуществляется он точно тем же физическим процессом, что и излучение самого Солнца, — тепловой радиацией. Да, представьте себе, Земля и остальные планеты тоже являются источниками излучения. Но температура этого излучения невелика и поэтому максимум его спектра лежит при длинах волн, далеких от видимого диапазона. Тепловое излучение Земли и планет происходит в далеком инфракрасном диапазоне — оно невидимо глазу.

Давайте вычислим температуру равновесного теплового излучения нашей планеты, считая альбедо ее равным 28%. Нам надо приравнять тепловой поток поглощенной Землей солнечной радиации $P(1 - A)$ полному потоку теплового излучения Земли. Она излучает, в среднем, как черное тело с радиационной температурой $T_{\oplus}$, которую мы сейчас и узнаем. Согласно закону Больцмана, плотность потока излучения есть $\sigma_B T_{\oplus}^4$, а чтобы узнать полный поток, надо эту величину умножить на площадь земной поверхности $4\pi R_{\oplus}^2$. Поэтому

$$4\pi R_{\oplus}^2 \sigma_B T_{\oplus}^4 = (1 - A) L_{\odot} \frac{R_{\oplus}^2}{4a_{\oplus}^2} = (1 - A) 4\pi R_{\odot}^2 \sigma_B T_{\odot}^4 \frac{R_{\oplus}^2}{4a_{\oplus}^2}.$$

Отсюда, извлекая корень четвертой степени, получим:

$$T_{\oplus} = T_{\odot} \sqrt{\frac{R_{\odot}}{2a_{\oplus}}} (1 - A)^{1/4} = 257 \text{ К.}$$

При такой температуре максимум теплового излучения приходится на длину волны $\lambda = 11300 \text{ нм}$, которая в 22 раза длиннее волны максимума солнечного спектра.

Итак, температура Земли получается 257 кельвинов или минус 16 градусов Цельсия. Неплохой морозец! А если бы мы приняли альбедо равным 0,4, то получили бы еще того меньше, минус 28 градусов. Бр-р! В чем же дело, однако?

Мы знаем, что среднегодовая температура умеренных широт Земли выше нуля, а еще немалую долю земной поверхности занимают тропики, где температура и летом, и зимой редко опускается ниже плюс 25°C. Может быть, у Земли есть и какой-нибудь другой источник тепла кроме солнечной радиации? Например, она может нагреваться за счет радиоактивного распада тяжелых элементов в ее недрах.

Да, такой источник энергии действительно есть. Температура в недрах Земли выше, чем у поверхности, она возрастает примерно на 30 градусов с каждым километром в глубь земной коры. Зная теплопроводность земных пород, можно оценить и тепловой поток из недр Земли наружу. Возьмем для оценки коэффициент теплопроводности базальта $\kappa = 2 \text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$. Тогда, чтобы узнать тепловой поток через всю земную поверхность $4\pi R_{\oplus}^2$, нужно умножить на нее коэффициент теплопроводности κ и градиент температуры $\frac{dT}{dz} = 0,03 \text{ К/м}$. Этот поток составит

$$Q = 4\pi R_{\oplus}^2 \kappa \frac{dT}{dz} \simeq 3 \cdot 10^{13} \text{ Вт.}$$

Вы видите, радиоактивный тепловой поток почти на 4 порядка уступает тому теплу, которое Земля получает от Солнца. Сам по себе поток тепла из земных недр мог бы поддерживать температуру земной поверхности, на порядок меньшую настоящей, — всего 30 кельвинов. Поэтому на климате нашей планеты тепло радиоактивного распада элементов, прогревающее породы в глубинах Земли, практически не сказывается — даже в условиях полярной ночи.

Итак, несоответствие радиационной и поверхностной температур Земли потоком тепла из недр не объяснить. Надо искать другую причину. Вот она. Оказывается, тепло в космос излучает, как правило, не сама земная поверхность, а атмосфера Земли, слой окружающего ее воздуха! На первый взгляд это кажется странным — ведь воздух прозрачен и не должен бы задерживать излучение твердой поверхности Земли и ее океана. Но спектр излучения при температуре земной поверхности около 300 К лежит

в далекой инфракрасной области. Поэтому мы не можем ничего сказать о свойствах веществ пропускать излучение, опираясь лишь на свои ощущения. А измерения инфракрасными спектрометрами показывают следующее. Основные компоненты воздуха — азот, кислород и инертные газы — и в инфракрасном диапазоне прозрачны. Луч, пройдя через всю толщу атмосферы, состоящей только из этих газов, ослабевает незначительно, даже если этот луч инфракрасный. Однако углекислый газ CO_2 и водяные пары H_2O , присутствующие в атмосфере в малых количествах, настолько сильно поглощают инфракрасную радиацию, что именно они и определяют прозрачность земной атмосферы в инфракрасном свете. Они же, следовательно, определяют и излучательные свойства нашей атмосферы. От непостоянной влажности воздуха и от содержания углекислоты зависит та высота, где инфракрасное излучение покидает Землю.

Равновесные температуры других планет можно вычислить так же, как и температуру Земли. Они зависят, главным образом, от расстояния планет до Солнца. Чем дальше расположена орбита, тем ниже температура поверхности планеты.

Альбедо тел Солнечной системы варьируются в широких пределах: от 6% у Меркурия и Луны до почти 100% у спутника Сатурна Энцелада. Альбедо больших планет меняется не так широко. Поскольку точные температурные условия на каждой из них таким путем все равно выяснить не удастся, примем при наших оценках альбедо всех планет равным 40%. Вычисленные таким образом равновесные температуры планет приведены в таблице 8.

Покажем теперь, как, зная температуру, радиус и массу планеты, можно оценить свойства ее атмосферы. На примере Земли вы видели, что способность небесного тела удерживать газ атмосферы зависит от отношения тепловой скорости молекул ко второй космической скорости. Давайте составим теперь другое отношение, которое тоже будет критерием удержания атмосферы. Сравним энергию гравитационного притяжения молекулы с массой μ/N_A с ее средней кинетической энергией. Ясно, что если отношение этой гравитационной энергии $Gm\mu/N_A R$ к величине kT окажется малым, то газ с молекулярной массой μ вооб-

ще не сможет оказаться в атмосфере, — он будет очень быстро улечиваться с планеты в космос. Напротив, для существования стабильной, мощной атмосферы отношение $\xi = Gm\mu/N_A kT$ должно быть значительно больше единицы.

Таблица 8

Атмосферы тел Солнечной системы

Небесное тело	Радиус (м)	Температура (К)	ξ_0	Описание атмосферы	Состав атмосферы
Солнце	$7 \cdot 10^8$	5780	4000	Солнце — целиком газовый шар	e^- , H^+ , H , He
Меркурий	$2,4 \cdot 10^6$	400	2,8	Атмосферы практически нет	—
Венера	$6,1 \cdot 10^6$	290	22	Мощная атмосфера над сушей	CO_2 , N_2
Земля	$6,4 \cdot 10^6$	250	30	Мощная атмосфера над океаном и сушей	N_2 , O_2 , H_2O
Луна	$1,7 \cdot 10^6$	250	1,4	Атмосферы нет	—
Марс	$3,4 \cdot 10^6$	200	7,7	Слабая атмосфера	CO_2 , N_2
Юпитер	$7,1 \cdot 10^7$	110	2000	Мощная атмосфера, непрерывно переходящая в жидкость	H_2 , He , CH_4
Сатурн	$6,0 \cdot 10^7$	80	950	Мощная атмосфера, непрерывно переходящая в жидкость	H_2 , He , CH_4
Титан	$2,6 \cdot 10^6$	80	5,3	Мощная атмосфера над метановым океаном (?)	N_2 , CH_4
Уран	$2,5 \cdot 10^7$	55	500	Мощная атмосфера	H_2 , He
Нептун	$2,2 \cdot 10^7$	45	800	Мощная атмосфера	H_2 , He
Плутон	$1,4 \cdot 10^6$	40	1,7	Атмосферы нет (?)	—

Величина ξ , как нетрудно видеть, есть отношение квадратов первой космической скорости планеты к тепловой скорости молекул. Вычислим это отношение для Земли при $\mu = 1$:

$$\xi_0 = \frac{Gm_{\oplus}}{kN_A R_{\oplus} T_{\oplus}} = 30.$$

Параметр ξ_0 для Земли оказался заметно больше единицы, что и соответствует большой и стабильной

атмосфере нашей планеты. Сделаем такую же оценку и для других небесных тел. Подсчитаем для Солнца, планет и некоторых их спутников отношение

$$\xi_0 = \frac{Gm}{kN_A RT}$$

и сопоставим его величину с нашими знаниями об их атмосферах. При этом температурой Солнца будем, естественно, считать температуру его поверхности, а для оценки температур планет и спутников возьмем их радиационные температуры.

Строго говоря, для Меркурия, Венеры и Луны надо было бы учесть, что вращаются они медленно, и поэтому температуры их освещенной и теневой сторон заметно различаются, а для удержания атмосферы важна температура освещенной стороны. Но качественное согласие и так получилось. Смотрите, чем меньше ξ_0 , тем слабее атмосфера планеты и тем тяжелее составляющий ее газ по молекулярной массе. При $\xi_0 < 3$ атмосфера отсутствует вообще. Марс, для которого этот параметр равен 7,7, имеет небольшую атмосферу преимущественно из тяжелого углекислого газа. Содержание же водяных паров, имеющих малую молекулярную массу, в атмосфере Марса ничтожно.

В таблицу 8 включен спутник Сатурна Титан — единственное, кроме планет, тело Солнечной системы, у которого обнаружена атмосфера. Этот факт был известен из астрономических наблюдений. Окончательно он подтвердился благодаря полету американского космического корабля «Вояджер-1», передавшего на Землю в 1979 и 1980 годах снимки Юпитера, Сатурна и их спутников.

В то же время большие значения ξ_0 у планет-гигантов согласуются с тем, что в их состав входят вещества с малой молекулярной массой. Водород и гелий могут удержаться только в атмосфере достаточно массивных тел. Но сами планеты-гиганты потому, наверное, и стали гигантами, что водород и гелий — самые распространенные элементы в Солнечной системе. По-видимому, падение равновесной радиационной температуры с удалением от Солнца привело к тому, что планеты-гиганты, состоящие из легких газов, легких элементов, расположены на пери-

ферии Солнечной системы, а малые планеты, почти вся масса которых составлена плотным веществом, расположены близко к Солнцу.

Объяснение состава атмосфер величиной ξ_0 привлекательно своей простотой, но оно, конечно, не дает возможности однозначно предсказывать химический состав атмосфер. Надо еще, чтобы разные газы атмосферы могли сосуществовать, чтобы они не реагировали быстро друг с другом и с веществами поверхности планеты. Это условие, однако, не является абсолютно необходимым. Например, в атмосфере Земли очень много кислорода, который активен, легко вступает в химические реакции. На поверхности нашей планеты достаточно горючего и веществ, способных окисляться, — вспомните хотя бы лесные пожары. Кислородное равновесие, как уже отмечалось, постоянно поддерживается реакциями фотосинтеза. Планетные атмосферы, таким образом, должны быть устойчивы по отношению к химическому равновесию при постоянном облучении половины планеты солнечным светом.

По-видимому, углекислота в большом количестве присутствовала в первичной атмосфере Земли, гораздо больше тогда походившей на атмосферу Венеры. Теперь же углерод, поглощенный растениями при фотосинтезе, накопился в геологических отложениях. Это каменный уголь, нефть, природный газ и мел. Мел образовался из остатков скелетов и раковин доисторических животных.

А как возник океан? Есть ли океаны на других планетах и из чего они состоят? Прежде всего, давайте четко сформулируем, что же такое океан, при каких условиях он может возникнуть.

Океан — это значительный слой жидкости на поверхности планеты, резкой границей отделенный от атмосферы. Поэтому температура хотя бы на части поверхности планеты должна быть выше температуры плавления того вещества, из которого океан состоит. Но этого недостаточно. Ведь если общая масса этого химического соединения на планете мала, то и при нужной температуре оно целиком может оказаться в атмосфере в виде газа. Следовательно, для существования океана нужно, чтобы парциальное

давление какого-либо газа около поверхности планеты оказалось бы выше давления насыщенного пара.

Но и это еще не все. Для каждого соединения известны величины критического давления и критической температуры. При давлении выше критического или при температуре выше критической нет физической разницы между жидкостью и газом, не существует поверхности раздела между этими фазами, они непрерывно переходят друг в друга. Отсюда сразу следует, что ни на одной из планет Солнечной системы не может быть гелиевого и не может быть водородного океанов. Критическая температура гелия всего 5 К, водорода — только 33 К. Они ниже, чем радиационные температуры всех планет. Гелий и водород, обильно присутствующие в атмосферах планет-гигантов, при погружении в их недра непрерывно, как на Солнце, переходят в плотные слои сильно сжатого вещества. Хотя оно там и похоже на жидкость, — расстояния между молекулами близки к размерам самих молекул — океаном его мы называть не станем: нет границы раздела с атмосферой.

По этой же причине на Юпитере, Сатурне, Уране и Нептуне нет ни метанового, ни аммиачного океанов, хотя в атмосферах эти газы присутствуют в малых долях. На тех высотах, где парциальное давление, скажем метана, превзойдет давление его насыщенного пара, он начнет конденсироваться. Но не в океан. При общей малой его концентрации этот конденсат будет не слоем жидкости, не океаном, а слоем мелких капелек метана, метановым облаком.

Чтобы нагляднее представить себе условия существования океана, допустим на минуту, что температура поверхности Земли оказалась выше, чем на самом деле. Закипит ли земной океан, если температура будет 100°C? Нет. Часть воды испарится, перейдет в атмосферу, так что парциальное давление водяных паров у поверхности океана окажется равным 1 атмосфере — давлению насыщенных паров воды при этой температуре. А общее атмосферное давление на Земле будет равно 2 атмосферам; другую половину его создадут парциальные давления азота и кислорода. Океан же при этом еще останется. А при какой же температуре он весь испарится?

Найдем сперва давление при этом у поверхности высохшей Земли. Если вся вода на Земле перейдет в атмосферу, то давление ее окажется в 267 раз больше нынешнего, поскольку масса воды в 266 раз больше массы атмосферы. Однако давление 267 атмосфер выше, чем критическое давление водяного пара, равное 218 атмосфер. Поэтому при повышении температуры исчезновение океана будет происходить так: атмосфера будет все больше насыщаться водяным паром вплоть до момента, когда давление его у поверхности океана станет равным критическому. Произойдет это при критической температуре, которая для воды равна 374°C , или 647 K . При этом граница вода — атмосфера исчезнет, а давление у бывшего океанского дна окажется равным 267 атмосферам.

Вернемся опять к обычной земной температуре, в среднем равной 15°C . При этой температуре давление насыщенного водяного пара равно $1700\text{ Па} = 0,0168\text{ атм}$. Отсюда легко оценить массу воды, которая содержится во всей земной атмосфере:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} \simeq 4\pi R_{\oplus}^2 \rho_{\text{H}_2\text{O}} \frac{1}{g} \simeq 9 \cdot 10^{16} \text{ кг.}$$

Ясно, что масса воды на планете обязательно должна превышать этот предел для существования океана.

Единственным, кроме Земли, претендентом в Солнечной системе на настоящий океан остается спутник Сатурна Титан. В атмосфере Титана, кроме азота, составляющего большую ее часть, был обнаружен метан и синильная кислота HCN . Измеренная «Вояджером-1» температура поверхности Титана 93 K выше температуры плавления метана 90 K и ниже его критической температуры, равной 191 K . А давление атмосферы у поверхности Титана оказалось в 1,6 раза больше давления земной атмосферы. При температуре 93 K давление насыщенных паров метана равно $0,16\text{ атм}$. Следовательно, для существования метанового океана на Титане достаточно, чтобы общее содержание метана в верхних его слоях превышало 10%.

Допустим, что это так, что вполне реально. А теперь вообразите себе картину поверхности Титана. Берег метанового океана из обычного водяного льда с примесью замерзшего аммиака и синильной кис-

лоты. На серо-зеленые метановые волны падает метановый снег. Тусклый, не сильнее лунного на Земле, свет далекого Солнца с трудом пробивается через красноватые метановые облака.

Но вот у горизонта появляется еще один расплывчатый светлый круг размером в 12 земных лун. Это восходит Сатурн *). Нужно быстро покинуть берег океана, переместить корабль на возвышенность, в безопасное место. Ведь скоро начнется прилив, а высота его на Титане по оценке получается около ста метров!

Океан величественно подымается, бурлят метановые потоки, брызги прибоя, окутанные испарением, вздымаются к темным тучам, совсем скрывшим и Солнце, и Сатурн. Кончается прилив, и бурный метановый ливень грозит смыть нас с неверных скал...

3. «Слоеный пирог» земной атмосферы

Очень непросто и интересно вертикальное строение атмосферы Земли. С высотой одновременно изменяются и плотность ρ , и давление p , и температура T воздуха. Нетрудно получить уравнения, определяющие высотные зависимости давления и плотности. Одно из них — это уравнение идеального газа с молекулярной массой $\mu = 29$ — средней молекулярной массой нашей азотно-кислородной атмосферы:

$$p = \frac{\rho N_A k T}{\mu}.$$

Второе уравнение — это тоже хорошо вам известное уравнение гидростатики, показывающее, как изменяется в жидкости давление с высотой z . Однако плотность атмосферы, в отличие от плотности несжимаемой жидкости, переменна. Поэтому уравнение гидростатики следует написать в дифференциальном виде, для изменения давления dp при приращении высоты на dz :

$$dp = -\rho g dz.$$

*) Здесь предположено, что Титан не повернут к Сатурну всегда одной стороной, а вращается относительно него. Так ли это на самом деле, неизвестно. Атмосфера Титана так плотна, что деталей его поверхности различить пока не удалось.

Знак минус показывает, что давление с высотой убывает.

Исключив из этих двух уравнений плотность, можно получить дифференциальное уравнение для зависимости давления от высоты:

$$\frac{1}{p} dp = - \frac{g\mu}{N_A kT} dz.$$

Заметьте, что в правой части уравнения стоит отношение приращения потенциальной энергии молекулы

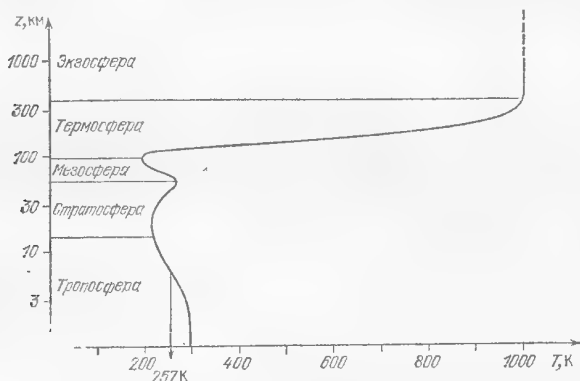


Рис. 31. Зависимость температуры от высоты в атмосфере Земли.

$mgdz = \mu g dz / N_A$ к характерной кинетической энергии молекул kT .

В случае, когда температура не меняется с высотой, это дифференциальное уравнение соответствует простой показательной зависимости давления от высоты. Если бы температура атмосферы оставалась равной, скажем, 300 К, то и давление, и плотность воздуха уменьшались бы в два раза при подъеме на каждые шесть километров.

Реально, однако, зависимости давления и плотности от высоты заметно уклоняются от такой показательной зависимости. Происходит это потому, что температура нашей атмосферы по высоте отнюдь не постоянна. Изменяется она совершенно нетривиальным образом. Посмотрите на рис. 31 и попробуйте догадаться, отчего возникает этот «слоеный пирог» холодных и горячих прослоек в нашей атмосфере.

При подъеме от земной поверхности температура сперва убывает. На высоте 17 км над тропиками и около 10 км над полярными областями во время полярного дня она имеет первый минимум: -75°C над тропиками и -55°C над полюсом. Это не ошибка — над полюсом на таких высотах температура выше, чем над тропиками!

Область снижения температуры, прилегающую к земной поверхности, называют тропосферой. Происходит это слово не от тропиков, но от того же греческого слова «тропос» — «поворот», от которого происходит и слово тропик. Над тропосферой происходит поворот температуры, над тропиками — поворот Солнца в дни солнцестояний.

Следующий слой атмосферы, где температура возрастает, называется стратосферой. Это слово происходит от латинского *stratum* — «настил». Минимум температуры между тропосферой и стратосферой называют тропопаузой. Возрастание температуры в стратосфере продолжается до высоты примерно 55 км. Там температура достигает максимума, близкого к 0°C , называемого стратопаузой.

Далее, до высоты 85 — 90 км расположена мезосфера; «мезо» по-гречески означает «средний». В мезосфере температура опять падает до -85°C . Выше простирается термосфера. В ней температура растет и достигает 1000—1200 К к высоте 400 км. Еще выше, во внешней оболочке атмосферы, в экзосфере, средняя кинетическая энергия молекул остается постоянной. Называть ее температурой было бы не совсем верно: плотность газа на этих высотах так мала, что молекулы уже практически не сталкиваются между собой. Но характерная энергия молекул водорода и гелия на больших высотах такая же, как при температуре 1000—1200 градусов.

— Чувшь нагородил! — скажет недоверчивый читатель. — Как же может там быть температура 1000 градусов, если как раз на этих высотах космические корабли летают и космонавты вкрутую не варятся. Да оно бы раскаленным докрасна было, это небо.

— Нет, неверно. Давление воздуха на этих высотах очень мало. На высоте 400 км оно составляет всего лишь 10^{-8} мм ртутного столба, на уровне лучшего вакуума, достижимого в земных условиях. Плот-

ность воздуха там всего $3 \cdot 10^{-12}$ кг/м³. Космическим кораблям такая атмосфера оказывает очень малое сопротивление, позволяющее им годами оставаться на орбите. Температура атмосферы велика, но из-за низкой плотности на температуру внутри космических станций внешняя среда влияния не оказывает. «Жара» снаружи — космонавтам не помеха. Внутренняя температура космических станций определяется, как и для естественных небесных тел, равновесием тепловой энергии, уносимой инфракрасным излучением, и энергии, получаемой от Солнца плюс собственное тепловыделение.

А почему же небо не красного каления? Этот вопрос посложнее. Не замечали ли вы: когда в голубоватое, прозрачное пламя газовой горелки внесешь щепотку поваренной соли или соды, оно становится ярко-желтым и непрозрачным. А температура его, поверьте, остается той же самой. Так что цвет газа определяется не только температурой, но еще и составом его, а главное, прозрачностью. И если среда прозрачна, то и излучает она слабо. Ну, а воздуху на больших высотах как же не быть прозрачным при такой-то низкой плотности!

Вот и подбираемся мы к объяснению загадки слоеного пирога. Все дело, оказывается, в том, как взаимодействует излучение Солнца с разными газами атмосферы, как эти газы поглощают свет различных длин волн. На рис. 24 были изображены вместе солнечный спектр и планковский спектр излучения Земли с температурой $T_{\oplus} = 257$ К. Заштрихованы те части спектра, которые напрямую до наземного наблюдателя дойти не могут, — их поглощают газы атмосферы. Отчасти случайным, но счастливым для нас, жителей Земли, является то обстоятельство, что большая часть излучения Солнца, имеющая длины волн вблизи максимума спектра, не поглощается атмосферой и доходит до поверхности, согревая ее.

А где же остается и куда девается поглощенная энергия заштрихованных участков спектра? Вы уже знаете, что она задерживается атмосферой, но на каких высотах? А именно на тех, где на рис. 31 температура выше радиационной: в экзосфере, в верхних слоях термосферы и стратосферы.

В образование экзосферы и термосферы вносят вклад почти все газы, входящие в состав воздуха. Там солнечные лучи проходят первый фильтр, который отсекает самую коротковолновую часть спектра, далекий ультрафиолет. Именно эта часть солнечного спектра наиболее сильно отличается от спектра Планка, спектра абсолютно черного тела. И мы уже знаем, именно она и связана с меняющейся солнечной активностью, с солнечным циклом. Поэтому температура экзосферы (от высоты она не зависит) существенно ниже в годы спокойного Солнца (1000 К) и выше в максимумах солнечной активности (до 1300 К).

А вот стратосфера своим существованием обязана только одному газу — озону O_3 . Область его повышенной концентрации располагается от 20 до 60 км, но он без остатка поглощает солнечное излучение в диапазоне $220 \text{ нм} < \lambda < 290 \text{ нм}$ уже в верхней части этого слоя. Хотя спектральный интервал поглощения озона и невелик, доля солнечной энергии, приходящаяся на него, раза в 3 больше, чем во всем более далеком ультрафиолете, поглощенном в экзосфере. Однако плотность воздуха в стратосфере существенно выше, энергия эта распределяется на гораздо большую массу газа. Оттого и температура стратосферы в максимуме, примерно равная 0°C , хотя и выше радиационной температуры Земли, все же в несколько раз ниже температуры экзосферы и термосферы. Выше стратосферы озона уже нет — он солнечной радиацией разбивается на осколки O_2 и O .

В промежутках между теплыми слоями располагаются холодные. Посмотрите еще раз на рис. 31 — «слоеный пирог» атмосферы. И теплые, и холодные слои высвечивают в космос энергию тепловым излучением и обмениваются энергией между собой. Только к теплым слоям энергия поступает за счет поглощения солнечного света, а до холодных «съедобная» радиация уже не доходит, им достаются лишь «объедки» за счет перемешивания и переизлучения.

Все сказанное прямо относится, конечно, только к дневной, освещенной стороне Земли. На ночной стороне происходит охлаждение. Поэтому практически во всей толще атмосферы температуры к утру перед восходом Солнца самые низкие, максимум же суточных температур, естественно, достигается незадолго до

захода. Тем не менее, слоистая структура атмосферы остается и ночью — не хватает полусуток для размывания, разрушения всех этих пяти сфер: тропо-, страто-, мезо-, термо-, эрго-. Только полярной ночью атмосфера сложена иначе.

Первый снизу слой атмосферного пирога — еще одно положительное отклонение от равновесной радиационной температуры Земли. Тропосфера — область

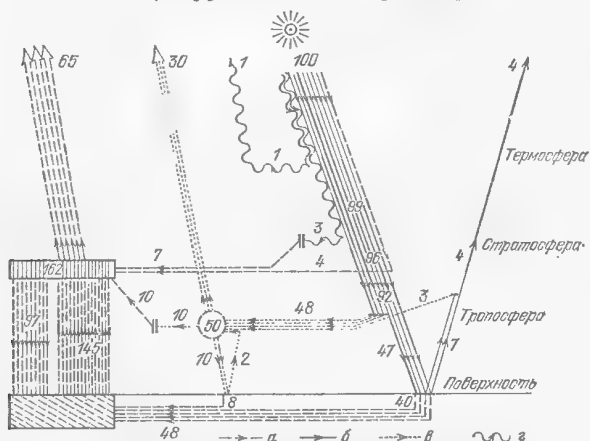


Рис. 32. Схема теплового баланса Земли: а — инфракрасное излучение; б — прямой видимый свет; в — рассеянный видимый свет; г — ультрафиолетовое излучение.

наибольшей интенсивности тепловых процессов и движения воздуха, область земной погоды. Нагревает тропосферу основная часть солнечного спектра, но сама она поглощает меньше половины доходящей до нее энергии. Поглощает свет в основном поверхность Земли, суша и океан, а затем они подогревают атмосферу снизу.

Давайте проследим, как перераспределяются потоки энергии, которую дает Земле Солнце. Возьмем сто условных единиц солнечной мощности, попадающей на Землю, и проследим за их путями в атмосфере (рис. 32). Один процент, далекий ультрафиолет солнечного спектра, поглощается молекулами в экзосфере и термосфере, разогревая их. Еще три процента ближнего ультрафиолета поглощаются озоном стратосферы.

Инфракрасный хвост солнечного спектра (4 процента) остается в верхних слоях тропосферы, содержащей пары воды (выше водяного пара практически нет).

Оставшиеся 92 доли энергии солнечного света приходятся на «окно прозрачности» атмосферы $290 \text{ нм} < \lambda < 2400 \text{ нм}$. Они проникают в плотные приземные слои воздуха. Значительная часть их (45 единиц), преимущественно в синей видимой части спектра, рассеивается воздухом, придавая голубой цвет небу. Рассеиваются, но не поглощаются, не переходят в тепло, а перераспределяются по направлению, из прямых солнечных становясь диффузными лучами, идущими почти равномерно во всех направлениях. Особенно сильно рассеивают свет облака — взвесь мелких водяных капель.

Прямые солнечные лучи — оставшиеся 47 процентов начального светового потока — достигают поверхности. Она отражает примерно 7 процентов из этих 47, и этот свет по пути в космос отдаст еще 3 единицы диффузному рассеянному свету неба. Сорок же долей энергии солнечных лучей, и еще восемь от атмосферы поглощаются поверхностью Земли, нагревая сушу и океан.

Рассеянная в атмосфере световая мощность (всего 48 долей) частично поглощается ею (10 долей), а остальное распределяется между поверхностью Земли и космосом. Почему в космическое пространство уходит больше, чем попадает на поверхность, 30 наверх, 8 долей вниз? Ведь голубое небо, казалось бы, отдает свет одинаково.

Основную роль тут играют облака. Они непрозрачны, и поэтому отбрасывают назад значительно больше света, чем пропускают вниз. Если вы летали на самолете, то должны помнить ослепительно яркий белый свет облаков, освещенных Солнцем. С земли небольшие облака кажутся светлыми — они пропускают достаточно, — но все же гораздо меньше того режущего глаз света, который они же отдают вверх. А большие, грозовые тучи темны — почти весь падающий на них свет, многократно рассеявшись на капельках воды, уходит вверх. Молекулярное поглощение при этом очень незначительно, поэтому свет, исходящий из облаков, по спектру близок к белому, солнечному. Вспомните еще — когда самолет при заходе на посадку проходит через плотный облачный слой, мо-

лочно-белый свет окружает вас со всех сторон, но сверху он немного ярче, чем снизу. Каждый объем облака, в пределах которого можно видеть, получает больше света сверху, а рассеивает одинаково — и вверх, и вниз. Поэтому интенсивность диффузного света внутри облака спадает при понижении. Внизу большого облака намного темнее, чем сверху.

У нас осталось 65 процентов начального потока солнечной энергии, перешедшей в тепло: 3 доли дал озон, 4 — пары воды верхней тропосферы, 10 — поглотились в основной толще атмосферы и, наконец, 48 долей перешли в тепло в почве и в водах океана. Часть последней энергии возвращается в атмосферу при конденсации водяных паров, но сейчас это несущественно. Все эти 65 долей в конечном итоге перешли в тепло и излучаются в космос тепловой радиацией.

Но весь спектр теплового излучения Земли — он вместе с солнечным изображен на рис. 24 — приходится на область поглощения паров воды и углекислого газа. Поэтому световая мощность, перешедшая у земной поверхности в тепловую, не может высвободиться сразу. Очень похоже на ситуацию внутри Солнца. И на ситуацию внутри облака — только теперь световой поток инфракрасный, глазу невидимый, и распространяется не вниз, а вверх. Так же, как на Солнце, излучение диффундирует во внешние слои, пока не дойдет до высоты, на которой поглощающих газов (в данном случае, паров воды) настолько мало, что они уже не могут существенно задержать свет и переизлучить его.

Эта высота и определяет радиационную поверхность нашей планеты, в физическом отношении аналогичную той сфере, которую мы называем поверхностью Солнца. Она лежит в верхней части тропосферы, там, где на рис. 31 кривая высотной зависимости температуры впервые пересекает прямую $T = T_{\oplus}$. Такого радиуса казалась бы наша планета наблюдателю, разглядывающему ее через инфракрасные очки. На схеме теплового баланса Земли (см. рис. 32) этот процесс переноса излучения символически изображен двумя встречными потоками энергий: 145 наших условных единиц вверх и 100 — вниз. Еще этот механизм прогрева земной поверхности и нижней атмосферы называют парниковым эффектом. Действительно, похоже,

В парнике солнечные лучи тоже легко проникают через прозрачное покрытие, нагревают почву, а тепло сразу уйти не может.

Все эти цифры теплового баланса представляют собой средние цифры для всей Земли целиком, безотносительно к географической широте. От времени года они почти не зависят. Их совсем не просто вычислять, а точность, с которой они сейчас известны, очень невелика. Ведь и само альбедо Земли, в этой схеме принятое равным 35%, по последним измерениям из космоса существенно меньше, только 28%. Но такой тепловой баланс уверенно объясняет, почему наша атмосфера похожа на слоеный температурный пирог и почему среднегодовая температура за вашим порогом заметно выше равновесной радиационной температуры Земли.

4. Ветры Земли

Отчего дует ветер? Задайте этот вопрос своим знакомым и вы, скорее всего, получите ответ: ветер дует из области повышенного давления туда, где давление ниже. Это верно лишь отчасти, но непонятно вот что: как могут длительно существовать возмущения давления.

Допустим, в комнате нет сквозняков, не работает пылесос. Тогда давление в ней везде на одной высоте будет постоянно. А если искусственно создать возмущение давления, например, проколоть тугий воздушный шарик, вы услышите хлопок. Это воздух расширился, затем, по инерции расширяясь дальше, создал в центре разрежение, которое снова заполнилось, и так далее. Пошла звуковая волна; она, ослабевая, достигла стенок комнаты, отразилась, вернулась к центру. В результате, через очень короткое время, соответствующее размеру комнаты, деленному на скорость звука, возмущения давления погасят друг друга. Никакого направленного движения воздуха, ветра, при этом не возникнет.

Но теперь представьте себе: зима, под окном теплая батарея. Воздух над ней поднимается, проходит под потолком, опускается у противоположной стены и, согрев всю комнату, а сам остыв, по полу движется обратно к батарее. Примерно так же согревается и

Земля в целом. Батарея, нагреватель ее, — тропики, противоположные стенки — полюса, а отклонения давления от среднего вызваны разностью температур и, следовательно, разностью плотности воздуха. Они разного знака на разных высотах и не могут выровняться за несколько часов, достаточных для того, чтобы звук обогнул весь земной шар.

Вы видите, причина переноса воздушных масс нам уже знакома. Это — конвекция, подъем теплого лег-

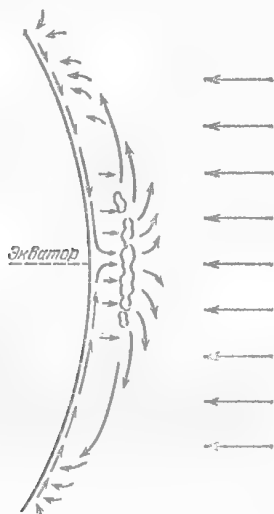


Рис. 33. Экваториальная конвекция — причина ветров.

кого воздуха, замещение его снизу воздухом холодным. Сильнее всего за день прогреваются тропические области, где солнечные лучи падают на Землю почти отвесно. Градиент температуры, падение ее с высотой вблизи поверхности, становится больше адиабатического, равновесного, отчего и возникает вертикальный поток воздуха. Воздух подымается вблизи экватора, приподнимая верхнюю границу тропосферы. Высота тропосферы в тропиках около 17 км, вдвое выше ее высоты у полюсов. Но куда же деваться этому воздуху? Легко понять — на больших высотах он растекается от экватора: северный воздух — на север, а южный — на юг (см. рис. 33). Вертикальные конвекционные

потоки переходят в горизонтальные, теплый воздух в верхней тропосфере отчасти охлаждается, отдавая тепловое излучение космосу, затем в средних широтах опускается вниз и устремляется обратно к экватору. Надо же возместить происшедшую там убыль воздушных масс от конвекционного подъема.

Так и работает тепловая машина Земли. Коэффициент полезного действия ее, η , невелик, всего один-два процента. Давайте оценим, какова же должна быть скорость ветров у поверхности Земли. Мощность источника энергии нам известна, это $P(1 - A)$ — мощность солнечных лучей, попадающих на Землю, за вычетом мощности отраженного планетой света. Порядок ее величины 10^{17} Вт. Вся она в конечном итоге переходит в тепло, а затем в тепловое излучение, но пока малая доля ее становится мощностью механической, $P_{\text{мех}} = \eta P(1 - A) \sim 10^{15}$ Вт, она движет тепловую машину атмосферы.

Кинетическая энергия земных ветров по порядку величины равна $m_A v_0^2$. Масса атмосферы нам известна, а скорость v_0 , характерную скорость ветра Земли, мы сейчас оценим. Ветры, рожденные у экватора, расходятся по всей планете, хотя, как мы увидим, и довольно сложным образом. Характерное время переноса кинетической энергии по порядку величины есть $\tau \sim R_{\oplus}/v_0$ — время, через которое воздушная масса перемещается на расстояние земного радиуса.

Теперь для оценки скорости ветров и времени переноса приравняем мощность $P_{\text{мех}}$ величине $m_A v_0^2/\tau = m_A v_0^3/R_{\oplus}$ — кинетической энергии, деленной на время ее переноса. Отсюда

$$v_0 \sim \left[\frac{\eta P (1 - A) R_{\oplus}}{m_A} \right]^{1/3} \sim 10 \text{ м/с};$$

$$\tau \sim \frac{R_{\oplus}}{v_0} \sim 6 \cdot 10^5 \text{ с} \sim 1 \text{ неделя}.$$

Десять метров в секунду, 36 км/ч, не много ли для средней скорости ветра у поверхности Земли? Во-первых, это всего лишь оценка, а главное, не надо судить об этой величине, исходя лишь из опыта жителя суши средних широт. Ветер на океанских просторах заметно крепче, чем над сушей, а скорости в десяток метров в секунду далеко до ураганной.

Очень важна вторая оценка. Неделя есть характерное время изменения погоды. Она — и характерное время ее флуктуаций, и время — физическая граница между краткосрочными изменениями погоды, вызванными только движениями воздушных масс, и долгосрочными, связанными с изменениями условий нагревания Земли.

Скорость ветра v_0 , полученная в оценках, это скорость движения воздуха около земной поверхности, ведь в кинетическую энергию была подставлена масса атмосферы, а большая часть ее сосредоточена на небольшой высоте. Однако от экватора воздух движется в верхней тропосфере, где давление и плотность его малы. Ясно, что скорость ветра там, наверху, должна быть такой, чтобы скомпенсировать приток его снизу. Должны быть равны потоки массы. Это условие дает на высоте z для оценки скорости: $v_z \sim v_0 \rho_0 / \rho_z$. В верхней тропосфере плотность воздуха на порядок меньше, чем у поверхности. Настолько же больше там скорость ветра. Действительно, на высотах около 10 км ветры дуют со скоростями порядка сотни метров в секунду, сотен километров в час.

А вот направлен ветер там реально отнюдь не на север и не на юг от экватора. Картинка рис. 33 качественно справедлива, но только как проекция направлений ветров на плоскость. На самом деле верхний ветер и в Северном, и в Южном полушариях отклоняется и становится ветром западным, а нижний, направляющийся к экватору, приобретает восточное направление. Этот восточный ветер, преобладающий на океанских просторах тропических широт, называется пассатом. Причина же этих отклонений — вращение Земли.

Чтобы легче понять, как вращение Земли отклоняет траектории движения, рассмотрим ясный пример — движение спутника. Посмотрим, как выглядит траектория спутника в земных географических координатах. На спутник действует только гравитационное притяжение и, если скорость его везде параллельна поверхности Земли, то кривая его движения — окружность большого круга, окружность с центром в центре Земли. Плоскость этой окружности неизменна относительно звезд. Однако сама Земля вращается, и за время одного оборота спутника T_c она поворачивается на угол $\Delta\lambda = 2\pi T_c / P_\oplus$. Поэтому на поверхности Земли,

в географических координатах, траектория спутника выглядит колеблющейся незамкнутой кривой. Ее можно видеть на фотографиях табло из Центра космических полетов, которое показывает движение космических кораблей над землей.

Нетрудно и вычислить такую траекторию. Для этого надо построить ее на неподвижной сфере, найти изменение во времени координат, долготы λ и широты φ , а затем угол λ смещать с угловой скоростью $\omega_{\oplus} = 2\pi/P_{\oplus}$, скоростью вращения Земли. Пример траектории спутника приведен на рис. 34.

Законы Ньютона в их первоначальном виде справедливы для инерциальных систем отсчета, — систем, движущихся равномерно и прямолинейно. Однако, находясь на Земле, нам удобно связать систему отсчета с ее поверхностью. Это и есть система географических координат. Она не является инерциальной, поскольку Земля вращается. Можно переписать второй закон Ньютона так, чтобы он был справедлив во вращающейся системе отсчета. Но при этом в правую часть его нужно добавить дополнительную силу. Называется она силой Кориолиса.

Сила Кориолиса перпендикулярна скорости материальной точки и пропорциональна скорости. Кроме того, сила Кориолиса зависит от широты места, как $\sin \varphi$. Общее выражение для нее таково:

$$F_{\text{Кор}} = 2m\omega_{\oplus}v \sin \varphi;$$

m — масса тела.

Посмотрите еще раз на траекторию спутника. Вы видите, каждый раз при пересечении экватора кривизна у траектории отсутствует — и сила Кориолиса на экваторе равна нулю. В Северном полушарии при движении спутника на восток сила Кориолиса направлена, в основном, к югу, что и приводит к возвращению траектории к экватору. В Южном полушарии угол φ меняет знак, и сила Кориолиса заворачивает спутник на север.

Подчеркнем еще раз, что сила Кориолиса не есть сила, вызываемая каким-либо реальным силовым полем, она возникает только вследствие описания явлений во вращающейся системе координат. Ведь траектория спутника была построена сперва в неподвижной системе отсчета — там она просто окружность —

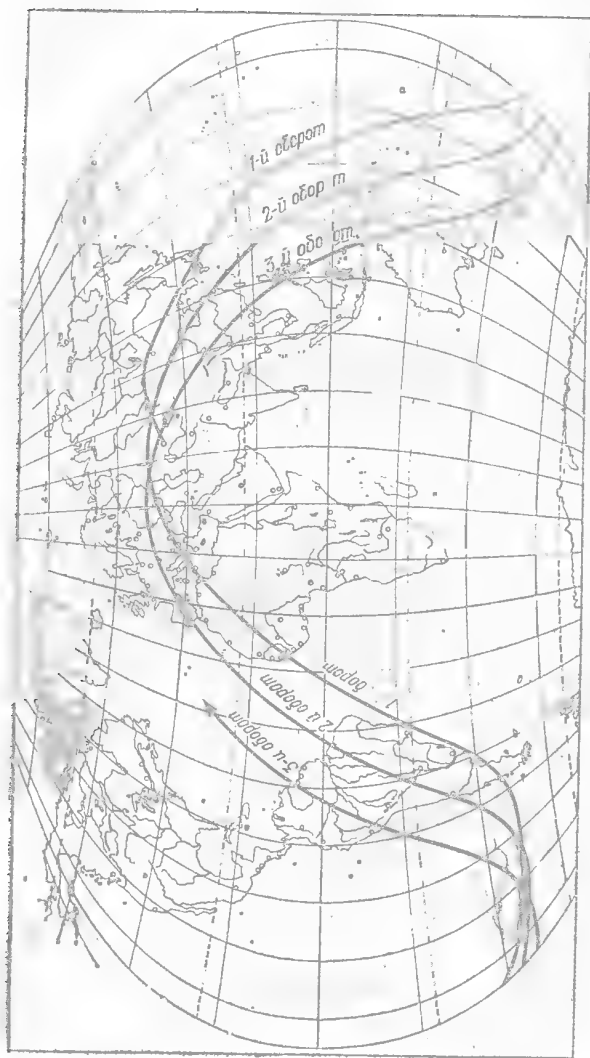


Рис. 34. Движение спутника над земной поверхью осью.

и только для объяснения ее в географических координатах нам понадобилась сила Кориолиса.

Не надо, впрочем, считать силу Кориолиса фиктивной, ее действия вполне реальны для нас. Ведь мы живем на вращающейся планете, и большинство явлений, наблюдаемых нами, происходит в тонком слое на поверхности вращающейся сферы. При передвижении по поверхности сферы точка переходит с одного

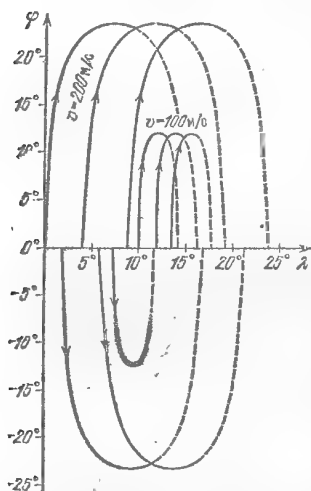


Рис. 35. Отклонение высотных ветров, отходящих от экватора, силами Кориолиса.

радиуса вращения на другой. Если мы не хотим этого замечать, хотим считать окружающий нас участок земной поверхности неподвижной плоскостью, то должны считать реальной силу инерции — силу Кориолиса. В нашем Северном полушарии она направлена вправо по ходу движения. По величине сила Кориолиса незначительна. При скорости, например, легковой машины, 20 м/с, ускорение Кориолиса равно всего 10^{-3} м/с², это лишь сотая процента ускорения силы тяжести. Поэтому на наших передвижениях сила Кориолиса практически не сказывается. Но проявления ее становятся заметны при дли-

тельном действии: правые рельсы железных дорог изнашиваются быстрее левых, а у наших рек — крутые правые берега и пологие левые. Но особенно сильно проявляется действие сил Кориолиса на глобальные воздушные потоки.

Вернемся к тропической циркуляции. Скорости воздушных потоков, оттекающих от экватора в верхней тропосфере, около 200 м/с. Конечно, кроме силы Кориолиса, на воздушные массы действуют и другие, аэродинамические силы. Но посмотрите, как меняют направление потоки, первоначально перпендикулярные экватору, под действием одной только силы Кориолиса (рис. 35). Сперва, вблизи экватора, сила Кориолиса

равна нулю, и потоки сохраняют направление движения. Затем они, как и траектории спутников, отклоняются вправо в Северном и влево в Южном полушарии. Поворот на 90° , когда потоки воздуха становятся направленными с запада на восток в обоих полушариях, происходит у широты φ_0 . Со скоростью потока эта предельная широта связана так:

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{v}{\omega_{\oplus} R_{\oplus}}.$$

Для скорости 200 м/с эта формула дает широту $\varphi_0 = 24^\circ$. Она, однако, не учитывает гидродинамических, некорриолисовых сил. На самом деле этот поворот в системе тропической циркуляции земной атмосферы происходит примерно к широте 30° . Там все потоки от экватора сливаются в два, южный и северный, струйных потока, два высотных ветра, дующих с запада на восток. Их называют еще циркумполярными, т. е. окружающими полюса, вихрями. На рис. 36 изображена их реальная карта. Эти вихри опоясывают земной шар.

Можно заметить, что, пересекая океаны, особенно Тихий, струйные течения отодвигаются в более высокие широты. Напротив, над сушей они проходят ближе к экватору. Причина этого явления качественно ясна: тропическая конвекция над океанами интенсивнее. Во-первых, альbedo океана меньше, чем альbedo суши, поэтому над водными просторами плотность поглощаемой солнечной энергии выше. Во-вторых, воздух над океанами влажный. Плотность влажного воздуха меньше, чем сухого, при одинаковых условиях, так как молекулярная масса паров воды меньше, чем средняя молекулярная масса воздуха. Благодаря этому тропические конвективные потоки поднимаются над океаном выше, чем над сушей, и придают большую скорость отходящим от экватора воздушным массам.

Средняя высота, на которой располагаются струйные потоки, равна 9 км, давление на этой высоте равно $2 \cdot 10^4$ Па, одной пятой давления у поверхности. Скорость в центре струйных потоков 30—35 м/с, что с лишним километров в час. На облет вокруг Земли струйному потоку требуется 8—10 дней в зависимости от времени года. Шары-зонды, наполненные гелием, иногда несколько десятков раз облетают Землю

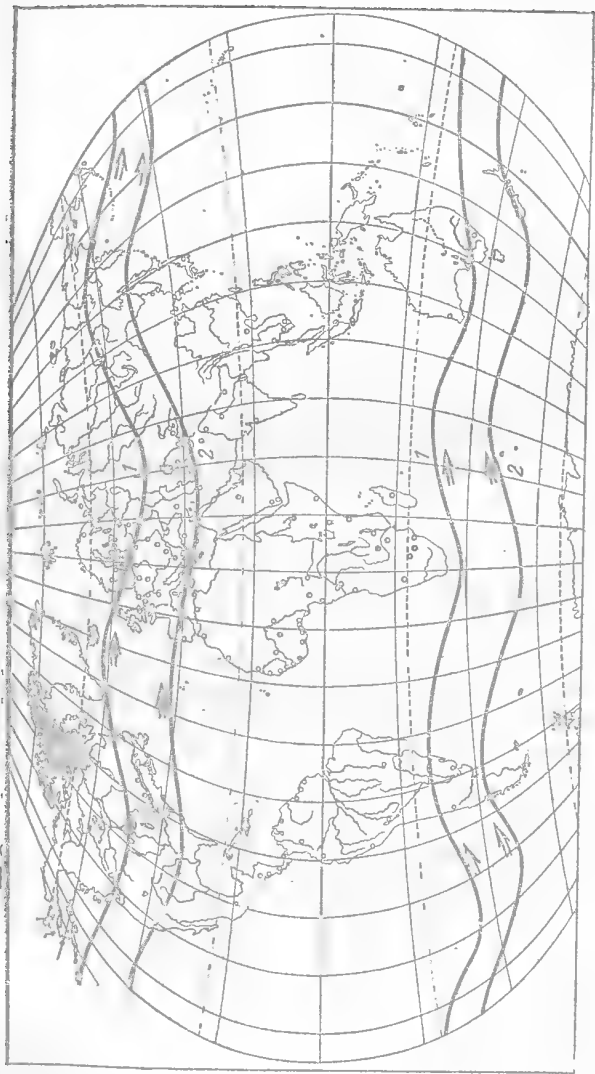


Рис. 36. Полож. вне циркулярных ветров летом (1) и зимой (2).

прежде, чем их вынесет из циркумполярного вихря. Это, правда, относится к Южному полушарию. А в Северном попытка кругосветного путешествия на воздушном шаре «Жюль Верн», предпринятая в 1981 году двумя американцами, не удалась. Помешали Гималаи — высочайший горный массив мира, находящийся как раз на широте струйного течения.

Широты, на которых располагаются циркумполярные вихри, естественно, зависят от времени года: весной и осенью они расположены почти симметрично; летом (Северного полушария) они смещаются на север — наш вихрь до $\varphi = 50^\circ$, южный — до 25° южной широты; зимой, наоборот, — северный струйный поток опускается ближе к экватору, а южный перемещается к 45° южной широты. И в течение одного сезона положение циркумполярного вихря не остается постоянным. Часто он образует изгибы, называемые меандрами, которые медленно перемещаются вдоль него. Это явление есть одна из главных причин сильных погодных вариаций.

При конвективном подъеме массы воздуха переходят в высокие разреженные слои атмосферы. При расширении происходит их охлаждение. На высоте, где температура падает ниже точки росы, воздух оказывается насыщен водяными парами — происходит конденсация воды, образуются облака. Земля постоянно окружена облачным поясом вблизи экватора. Именно там конвекция, вертикальный подъем влажного воздуха, наиболее интенсивна, и небо над экватором почти всегда в облаках.

Поднявшийся над тропиками на высоту 17 км воздух охлаждается до температуры минус 75 градусов Цельсия и становится очень сухим — почти вся влага его осталась в облаках, на высотах 1—5 км. При дальнейшем движении от экватора и в струйных потоках этот воздух теряет энергию на тепловое излучение в космос, одновременно опускаясь вниз и теряя скорость. Воздушные массы конвективного потока западают у экватора огромной внутренней энергией. Та часть ее, которая расходуется на подъем, выделяется обратно при опускании. Путь от экватора до широт циркумполярного вихря воздух проходит очень быстро, примерно за сутки. За это время много энергии в космос он отдать не успевает, поэтому температура его,

когда он вновь опускается к поверхности, высока, около 30°C. Температура у экватора почти такая же, только там воздух влажный — и внутренняя энергия его поэтому больше.

Опускание воздуха к поверхности из циркумполярных вихрей происходит на широтах 25—30 градусов. Воздух этот очень сухой и теплый. Посмотрите на физическую карту мира — именно там расположены крупнейшие пустыни Земли: Сахара в Африке, Аравийская и пустыня Тар в Азии. И в Южном полушарии на небольших участках суши, лежащих южнее циркумполярного вихря, — тоже пустыни: Калахари в Африке, несколько пустынь Австралии. На американском континенте пустынь меньше (в этом заслуга горной цепи Анды — Кордильеры), но расположены они на тех же широтах.

Теплый сухой воздух опускается сверху и растекается по поверхности. Скорость его опускания невелика и горизонтальные скорости тоже незначительны. Широты под циркумполярными вихрями — это область штилей. Они издавна получили от моряков название «конские широты». Во времена парусного флота корабли, случалось, месяцами не могли из них выбраться. От жары и жажды страдали люди, но прежде них погибали перевозимые морем лошади — немало лошадиных скелетов лежит на дне Атлантического и Индийского океанов в конских широтах.

Конские широты — область повышенного давления, а вблизи экватора, в зоне конвективного подъема, давление ниже нормального. Это говорится о стандартно измеряемом давлении на уровне моря. Почему же эта разность давлений практически постоянна, почему она не выравнивается со скоростью звука, как при хлопке в ладоши? Посмотрим, однако, как распределено давление по высоте вблизи экватора и под струйными потоками. Как уже известно, давление с высотой изменяется так:

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{dz} = - \frac{\mu g}{N_A k T}.$$

Температуры поверхности у экватора и в конских широтах почти равны, но воздух вблизи экватора влажен. Примеси водяного пара, достигающие 3% по массе, понижают среднюю молекулярную массу газа,

ведь $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18$ меньше $\mu_{\text{возд}} = 29$. Поэтому экваториальный воздух легче, правая часть уравнения для него меньше, следовательно, и давление его падает с высотой вблизи поверхности медленнее, чем у сухого воздуха.

Наверху над экватором — самое холодное место земной тропосферы, там -75°C , а над струйными потоками на той же высоте немного, на 10 градусов, теплее. Так как влажность в обоих случаях ничтожно мала, то круче падает с высотой уже экваториальное давление. Выше, в стратосфере, обе зависимости давления от высоты сливаются. Зависимости давления от высоты для экваториальных и конских широт выглядят примерно так, как на рис. 37. Смотрите: там, где давление у поверхности выше нормального, в верхней тропосфере оно ниже, чем для невозмущенной атмосферы на той же высоте. И наоборот, всегда, когда

мы говорим о «пониженном давлении», надо иметь в виду, что ниже нормального оно только у поверхности, там где его обычно измеряют, наверху же оно выше, чем у средней атмосферы!

Такие неоднородности давления рождают не звуковые волны, а потоки воздуха, верхний и нижний, направленные в противоположные стороны. Они поддерживаются подъемом воздуха в области низкого (на поверхности!) давления и опусканием его в области высокого давления. Первоначальные направления этих потоков отклоняются силой Кориолиса по часовой стрелке в Северном полушарии и против часовой стрелки в Южном. Нижние потоки, направленные от конских широт к экватору, это и есть пассаты — северо-восточные ветры нашего полушария и юго-восточные Южного,

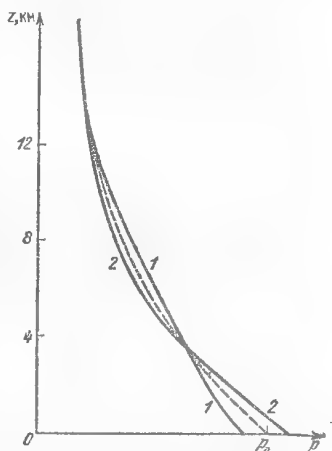


Рис. 37. Высотные зависимости давления в циклоне (1) и антициклоне (2).

Почти такое же объяснение пассатов было дано еще в 1735 году английским ученым Хэдли (G. Hadley) с тем отличием, что по его мнению, атмосферная циркуляция от экватора распространяется до полюсов. В его честь тропический круговорот воздуха называется ячейкой Хэдли или, в старой литературе, — ячейкой Гадлея *).

А как в среднем направлены потоки воздуха в более высоких широтах? Повышенное давление у поверхности на широте $30-40^\circ$, под струйными течениями, рождает, кроме пассатов, еще и ветры, направленные к широтам $60-70^\circ$. В то же время относительно низкое давление над струйными потоками оттягивает воздух не только от экватора, но и с высоких широт. Так образуется еще одна, обратная по направлению, ячейка атмосферной циркуляции, ячейка Феррела **).

Циркуляцию во второй ячейке поддерживают не только высокое давление на тридцатиградусных широтах, но еще и низкое у поверхности океана давление на широтах $\varphi = \pm 60^\circ$. Оно, как и экваториальное, обусловлено конвекцией. А энергию для этой конвекции приносят океанские течения.

Поскольку движение воздуха в ячейке Феррела обратное по сравнению с ячейкой Хэдли, то в другую сторону отклоняет воздушные потоки и сила Кориолиса. Поэтому в средних широтах преобладают западные ветры. В Южном полушарии, где препятствие — только полоска Анд Южной Америки, этот западный ветер у поверхности океана разгоняется почти до ураганной силы. Недаром эта область широт названа моряками «ревущие сороковые».

Наконец, ближе к полюсам циркуляция воздуха происходит опять в прямом направлении. От областей низкого давления воздух поднимается, а опускается около полюсов, создавая там повышенное давление у поверхности. Вследствие кориолисова отклонения вокруг полюсов преобладают восточные ветры.

*) Теперь мы пишем английские фамилии так, как они произносятся по-английски, а в XVIII веке было принято называть англичан по латинскому прочтению их фамилий. Вспомните ломоносовское: «И может собственных Платонов и быстрых разумом Невтонов Российская земля рождать», — не сразу и поймешь, что имелся в виду Исаак Ньютон (I. Newton).

**) Английский школьный учитель, в 1856 году модифицировавший схему Хэдли.

Эта схема (рис. 38) описывает только очень усредненную картину земных ветров. Одни отклонения от нее связаны с рельефом суши и разным альбедо суши и моря. Другие отклонения — возмущения ее, изменяющиеся во времени, — являются тем, что принято называть погодой.

И еще одно. Может сложиться впечатление, что физика процессов глобальной циркуляции нам уже совершенно ясна и только здесь излагается в упрощенном виде, без мудрых формул. Увы, это не так. Основная сложность здесь в том, что оказывается

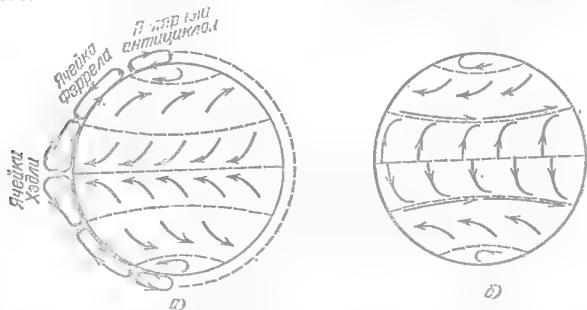


Рис. 38. Глобальная схема земных ветров — ячейки атмосферной циркуляции: а) ветры у поверхности; б) ветры верхней тропосферы.

невозможным отделить явления климата от погодных явлений. Оказывается, что стационарно, по схеме рис. 38, ветры дуть не могут! Переменчивость, неспокойствие есть неотъемлемое свойство земной атмосферы.

В своей работе 1735 года, где дано почти такое же, как здесь истолкование пассатов, Дж. Хэдли пишет: «Я думаю, что никому из писавших на эту тему, не удалось полностью объяснить причины возникновения пассатов». А вот как начинается свою книгу, написанную 232 года спустя, один из современных авторитетов по атмосферной циркуляции американец Э. Лоренц: «Эти слова, которыми открывается классический труд Хэдли, точно характеризуют состояние наших знаний в этой области и в настоящее время. Несмотря на многие замечательные исследования, выполненные после Хэдли, исчерпывающего объяснения общей циркуляции атмосферы до сих пор не найдено».

5. Мировой океан, его течения

Твердая поверхность нашей планеты, кора Земли, частично покрыта океанской водой. Масса океана равна $m_{\text{ок}} = 1,37 \cdot 10^{21}$ кг. Если бы кора Земли была правильной сферой, то глубина океана оказалась бы везде равной $m_{\text{ок}}/4\pi R_{\oplus}^2 \rho_0 = 2750$ м. Форма твердой поверхности Земли, однако, в среднем примерно на

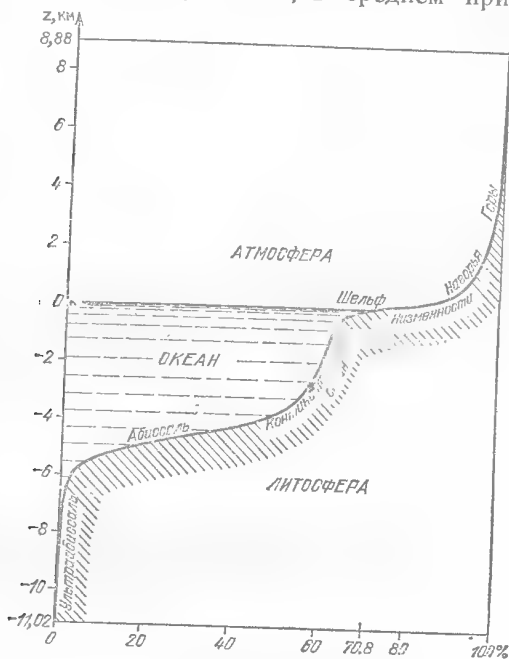


Рис. 39. Гипсографическая кривая — распределение высот и глубин земной коры.

такую же величину отличается от идеальной сферы. Поэтому океан покрывает только две трети земной поверхности.

Посмотрим, как уклоняется земная твердь от средней сферы, как распределена кора по высоте этого уклонения. Такая зависимость называется гипсографической кривой. Из рис. 39 видно, что высокие горы и глубокие впадины океанского дна занимают всего лишь около 1% земной поверхности. Основная пло-

щадь Земли занята двумя относительно пологими поверхностями. Это равнины суши и океанское дно. Между ними существует довольно резкий перепад высот.

На первый взгляд, для чисто случайной поверхности гораздо более естественной была бы гипсографическая кривая с одним пологим участком, с одним перегибом. Такой оказывается, например, аналогичная кривая для взволнованной поверхности моря. То, что земная поверхность дает все же два перегиба на гипсографической кривой, указывает на принципиальное геологическое различие в строении континентов — приподнятых участков суши — и океанского дна. Гипсографическая кривая — результат геологической истории нашей планеты.

Эта кривая дает усредненный, а потому сильно сглаженный профиль перехода суша — океанское дно. Типичная же зависимость уклона поверхности дна при удалении от берега выглядит так. Сперва глубина растет медленно, с уклоном всего 1,5—2 метра на километр. Эта мелководная область вокруг материков простирается в среднем на 80 км и называется континентальным шельфом.

Затем начинается резкий обрыв и уже через 30—35 км достигается глубина в 3 км. У побережья Цейлона средний уклон достигает даже 30°. Эта область называется континентальным склоном. Далее, после небольшой переходной области лежат абиссальные*) равнины — обширное, почти плоское ложе океанов с глубинами от 3,7 до 6 км. Абиссаль только изредка пересекается подводными хребтами и глубоководными желобами, впадинами, где достигаются рекордные глубины в 10—11 км.

Океанская вода как бы залита в сосуд с краями, повторяющими гипсографическую кривую. Она наполнила его до уровня, лежащего на 2,44 км выше средней сферы земной коры. Современный океан покрывает 70,8% всей земной поверхности.

Количество воды в океане не строго постоянно. Известно, что уровень океана неоднократно падал на

*) Итальянское слово *abisso* означает «провал», «бездна». Оно отражает трепет древних моряков перед недостижимыми глубинами океанов.

120—150 метров ниже современного. Тогда шельф становился сушей, а континентальный склон начинался сразу у берега, местами даже обнажаясь. А где же были эти сто пятьдесят метров водной толщи? — Эта вода накапливалась на суше огромными ледниками, такими же ледяными горами, которыми сейчас покрыты Антарктида и Гренландия. В периоды оледенения доля поверхности, занятая океаном, сокращалась процентов на пять. По площади океан практически всегда преобладал над сушей.

Возраст земного океана незначительно уступает возрасту самой Земли. Естественно, океан находится почти в полном химическом равновесии с атмосферой Земли и ее корой.

Таблица 9

Состав океанской соли

Катионы	Доля массы	Анионы	Доля массы
Na ⁺	30,60%	Cl ⁻	55,02%
Mg ⁺⁺	3,68%	SO ₄ ⁻⁻	7,71%
Ca ⁺⁺	1,17%	Br ⁻	0,19%
K ⁺	1,13%	HCO ₃ ⁻	0,41%
Si ⁺⁺	0,02%	H ₃ BO ₃	0,07%
Сумма	36,6%		63,4%

Океан — насыщенный раствор атмосферных газов. Но растворимости их в воде невелики. При 15 °C доля азота по массе равна $1,3 \cdot 10^{-5}$, кислорода — $7,9 \cdot 10^{-6}$. Более заметна — и очень существенна для органической жизни в океане — концентрация углекислоты, она при этой температуре может достигать $5,5 \cdot 10^{-4}$ от массы морской воды. Можно подсчитать, что общая масса растворенной в океане углекислоты в 30—100 раз превосходит массу всей атмосферной углекислоты.

Океан за свою историю растворил большую часть растворимых в воде химических соединений, которые есть на нашей планете. В основном, это соли. Поскольку в воде они диссоциируют на ионы, разумнее указать состав океанской соли отдельно по катионам и анионам (табл. 9).

Конечно, вода океана электрически нейтральна. Липионов по массе получается больше, в основном, за счет того, что масса атома хлора больше, чем натрия.

Среднее содержание такой смеси солей в океане равно 35,2 г в килограмме морской воды. Эту величину, соленость, в таких единицах, т. е. в тысячных долях, обычно и измеряют. Иначе эту безразмерную единицу измерения называют промилле*) и обозначают ‰.

Соленость морской воды заметно меняется от места к месту — испарение повышает соленость, дожди и речной сток разбавляют воду. А вот соотношения между солями, отраженные в таблице 9, очень стабильны. За исключением иона HCO_3^- , концентрация которого вместе с растворимостью угольной кислоты сильно падает с ростом температуры, солевой состав океанов и морей практически не зависит ни от географического места, ни от глубины. Постоянство состава растворенных солей было обнаружено первой научной экспедицией по изучению океана в 1872—1875 годах на английском судне «Челленджер».

Плотность соленой воды больше плотности пресной. При температуре 0°C океанская вода средней солености имеет плотность $1,028 \text{ г/см}^3$, при 15°C — $1,026 \text{ г/см}^3$. При повышении давления плотность воды растет незначительно. Даже на глубине 5 км, где давление в 500 раз превосходит атмосферное, плотность морской воды при 0°C равна $1,051 \text{ г/см}^3$.

Очевидно, что чем глубже, тем плотность океанской воды должна быть выше. Если это соотношение нарушается, возникает течение. Так происходит там, где горячие сухие ветры при безоблачном небе вызывают интенсивное испарение и осолонение поверхностных вод.

Наглядным примером такого термохалинного**) течения может служить циркуляция вод в Средиземном море. Через Гибралтар, узкий пролив, отделя-

*) Pro mille — латинское «на тысячу». Сравните со словом процент — pro cent — «на сто».

**) Греческое «халс» означает «соль». От него же происходит и слово «галоген» — «рождающий соли», — элемент 7-й группы таблицы Менделеева.

ющий его от Атлантического океана, в Средиземное море втекает мощный поток океанской воды с соленостью 36‰. Чем восточнее, тем соленость поверхностных вод Средиземноморья становится выше и у побережья Турции соленость достигает уже 39—40‰. Осолоненная тяжелая вода опускается на дно, согревая придонные воды. Хотя глубина Средиземного моря незначительно отличается от среднеокеанской, температура около дна в нем 12°C, на 9—10 градусов выше обычной температуры океанских глубин. В придонных слоях течение направлено в противоположную сторону, на запад. И наконец, тяжелая соленая вода по дну пролива изливается в океан. Суммарный поток через Гибралтар все же направлен в сторону Средиземного моря — все реки, втекающие в него, не в силах компенсировать убыль воды из-за испарения.

Интересно, что при таянии ледников, айсбергов и морского льда океанская вода становится менее плотной, несмотря на то, что она при этом охлаждается: опреснение сильнее уменьшает плотность, чем охлаждение увеличивает ее. Поэтому айсберги — глыбы льда, отколовшиеся от ледников Антарктиды и Гренландии, плавают как бы на подушках из почти пресной, легкой воды, которая с окружающей соленой водой перемешивается довольно медленно.

Казалось бы, распресненная и к тому же согреваемая солнцем легкая вода должна от Антарктиды и Арктики течь по поверхности в низкие, экваториальные широты. Этого, однако, не происходит и, по-видимому, не происходило и тогда, когда климат Земли был иным. На самом деле распресненная поверхностная вода вокруг Антарктиды перемешивается ветрами «ревущих сороковых» широт. Там, уже почти сравниваясь с нижележащей океанской водой по солености, но еще холодная антарктическая вода опускается и проникает холодным языком до экватора в Индийском океане и даже до Северного тропика в Атлантическом и Тихом (см. рис. 40). Минимум солености лежит на глубине около 1000 метров.

В тропиках происходит постепенное смешение теплой соленой поверхностной воды с холодной распресненной водой антарктического языка. Происходит оно весьма своеобразно. Оказывается, что в разно-

нагретой воде температура выравнивается в сто с лишним раз быстрее, чем в разносоленной воде выравнивается соленость. Поэтому, если над холодной пресной водой лежит слой соленой теплой воды, возникает неустойчивость. Развивается она так (рис. 41).

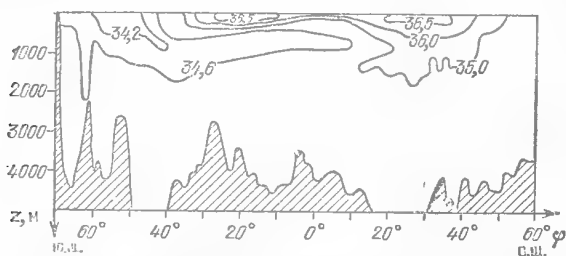


Рис. 40. «Язык» распресненных вод океана от Антарктиды до тропиков (разрез по Атлантическому океану).

Допустим, возник небольшой прогиб поверхности раздела. В нем соленая вода остывает быстрее, чем рядом, на плоских участках, но не успевает перемещаться с окружающей пресной водой. В результате эта масса становится плотнее окружающей жидкости



Рис. 41. Рост солевых пальцев в расслоенной воде.

и начинает опускаться, вытягивая за собой узкую струю верхней соленой воды, так называемый солевой палец. Солевые пальцы дробятся на более узкие и окончательно перемешиваются с окружающей водой на глубине. В лабораторных условиях солевые пальцы нетрудно наблюдать, особенно, если соленую воду подкрасить. В океане разность температур и соленостей невелика, но такая неустойчивость способствует перемешиванию.

Антарктические и арктические воды на глубине поступают в экваториальные широты, поверхностные же теплые воды переносятся от тропиков на север и

юг. Основной движущей силой поверхностных течений является ветер.

Давайте посмотрим, как течение рождается ветром. Пусть над участком водной поверхности дует ветер со скоростью W . Надо заметить при этом, что строго определить, чему равна скорость ветра, отнюдь не просто. Во-первых, эта скорость растет с высотой, у самой поверхности она практически равна нулю. Во-вторых, ветер над морем пульсирующий, ведь ему приходится огибать морские волны. Поэтому за скорость W условно принимают среднюю скорость на высоте 15 м, высоте мачт небольшого судна. На этом уровне скорость ветра уже медленно меняется с высотой; так, на высоте 20 м средняя скорость ветра равна $1,037 W$.

Трение ветра о поверхность воды создает в ней напряжение, касательные, скользящие сдвиговые силы. Сдвиговое напряжение σ есть сила трения, приходящаяся на единицу площади. Размерность его поэтому есть $\text{Н/м}^2 = \text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$. Поскольку величина трения определяется ветром, то она зависит только от физических характеристик воздуха, его плотности ρ_1 и скорости W . Из этих величин можно составить только одну комбинацию, имеющую ту же размерность: $\rho_1 W^2$. Следовательно, сдвиговое напряжение пропорционально плотности кинетической энергии ветра.

Безразмерный коэффициент пропорциональности, измеренный экспериментально, оказывается довольно малым, равным $2,5 \cdot 10^{-3}$. Причиной малости коэффициента является то, что высота измерения ветра, 15 м, выбрана с физической точки зрения произвольно. Реально вязкие процессы в воздухе, передающие напряжение жидкости, происходят на меньших высотах, где скорость воздуха на порядок меньше W . Будем поэтому записывать зависимость сдвигового напряжения от скорости ветра в виде:

$$\sigma = \rho_1 (0,05 W)^2,$$

отражающем физический смысл скорости $0,05 W$.

Сдвиговое напряжение вызывает течение жидкости со скоростью v , меняющейся с глубиной z . При скольжении верхних слоев относительно нижних это напряжение уравновешивается силами вязкости

$$\sigma = -\eta \frac{dv}{dz}.$$

Здесь η — коэффициент вязкости, а знак минус показывает, что вязкое трение направлено против скорости.

Рассмотрим сначала ветровое течение в мелком обширном водоеме. Тогда на его дне, на глубине D , скорость течения равна нулю, а напряжение вдоль всего слоя воды постоянно. В результате скорость линейно меняется с глубиной:

$$v = v_0 \left(1 - \frac{z}{D} \right);$$

$$v_0 = \frac{\sigma D}{\eta} = \frac{D \rho_1}{\eta} (0,05 W)^2.$$

Давайте оценим, какая получается скорость поверхностного течения v_0 при глубине бассейна, скажем, 1 м, и скорости воздуха $W = 1$ м/с. Используем табличные значения плотности воздуха $\rho_1 = 1,2$ кг/м³ и вязкости воды $\eta = \eta_0 = 1,0 \cdot 10^{-3}$ кг/(м·с). В результате — абсурдный ответ: $v_0 = 2,9$ м/с. Но не может же скорость течения быть больше скорости ветра, вызывающего течение. Налицо явная ошибка.

Ошибка эта состоит в том, что движение жидкости рассматривалось, как плоскопараллельное течение. Таким оно будет только при очень малых скоростях. Медленные, плавные течения жидкости называются ламинарными. При скорости течения, превышающей некоторый предел, ламинарное движение становится неустойчивым. Характер течения жидкости или газа резко меняется — в среде возникают завихрения, перемещения отдельных точек становятся хаотическими. Такое течение называют турбулентным *).

Формулы, описывающие вязкое движение, отнюдь не всегда работают при турбулентности. В лучшем случае они применимы только для скорости, усредненной по турбулентным пульсациям мелкого масштаба. Турбулентный коэффициент вязкости, однако, всегда значительно больше, он может на много порядков превосходить ламинарный η_0 .

Где проходит грань между ламинарным и турбулентным течениями? Начиная с какого предела, ламинарное движение становится неустойчивым? В нашем

*) Вот значения соответствующих латинских слов: lamina — «тонкий слой», «пластинка»; turbo — «вихрь», «смятение»; turba — «толпа».

примере характерная скорость жидкости есть v_0 , характерный размер задачи — D . Рассмотрим безразмерное отношение

$$Re = \frac{v_0 D \rho_0}{\eta_0},$$

называемое числом Рейнольдса. Оказывается, что течение ламинарно при малых числах Рейнольдса и турбулентно при больших.

Граница, критическое число Рейнольдса $Re_{кр}$ зависит от конкретной геометрии течения. Обычно оно лежит в диапазоне 10—30. Турбулентная вязкость примерно линейно растет с числом Рейнольдса и переходит в обычную ламинарную вязкость при $Re < Re_{кр}$:

$$\eta \simeq \eta_0 \frac{Re}{Re_{кр}} \quad \text{при } Re > Re_{кр}.$$

Оценим снова скорость поверхностного течения в тех же условиях, но с турбулентной вязкостью: $v_0 = \sigma D / \eta = \sigma Re_{кр} / \rho_0 v_0$. Отсюда

$$v_0 \simeq \sqrt{\frac{\sigma Re_{кр}}{\rho_0}} \simeq 0,05 W \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_0}} Re_{кр} \simeq 0,013 W.$$

Таким образом, скорость течения у поверхности пропорциональна скорости ветра. При глубине в 1 м и ветре в 1 м/с порядок величины поверхностной скорости $v_0 \sim 1$ см/с, а число Рейнольдса $Re \sim 10^4$.

Все это, однако, еще не применимо к реальному глубокому океану. В 1893—1896 годах норвежский исследователь Арктики Ф. Нансен во время дрейфа во льдах Северного океана на судне «Фрам» заметил, что при постоянном ветре дрейф происходит не в направлении ветра, а под углом 20—40° направо от него. Нансен сам дал качественное объяснение этому явлению: кроме ветрового напряжения на течение действует и ускорение Кориолиса. Напомним, оно вызвано вращением Земли с угловой скоростью $\omega = 7,3 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, направлено перпендикулярно скорости направо в Северном полушарии и налево в Южном, а по величине равно $2\omega v \sin \varphi$.

В 1905 году шведский ученый В. Экман создал теорию ветрового течения в открытом глубоком океане. Посмотрите, как удивительно поворачивается течение в глубине (рис. 42) под действием силы Кориолиса.

Вот формулы, описывающие эту спираль Экмана. Если ветер направлен по оси y , то вектор скорости течения (v_x, v_y) на глубине z равен

$$v_x = \pm v_0 e^{-kz} \cos\left(\frac{\pi}{4} \mp kz\right);$$

$$v_y = v_0 e^{-kz} \sin\left(\frac{\pi}{4} \mp kz\right).$$

Нижний знак относится к Южному полушарию.

Поверхностная скорость v_0 по величине примерно такая же, как и в случае мелкой воды, но направлена она под углом 45° к направлению ветра, направо в Северном полушарии и налево в Южном. Вектор скорости при углублении поворачивается. На глубине $z = 3\pi/4k$ он направлен уже против ветра! Скорость течения там равна $v_0 \exp\{-3\pi/4\} = 0,095 v_0$. На глубине π/k вода течет в сторону, противоположную поверхностному течению со скоростью $v_0 \exp\{-\pi\} = 0,043 v_0$. Параметр k определяет характерную глубину, на которой происходит поворот течения и затухание его скорости. Он зависит от географической широты φ и численно равен

$$k = \frac{\omega |\sin \varphi|}{v_0}.$$

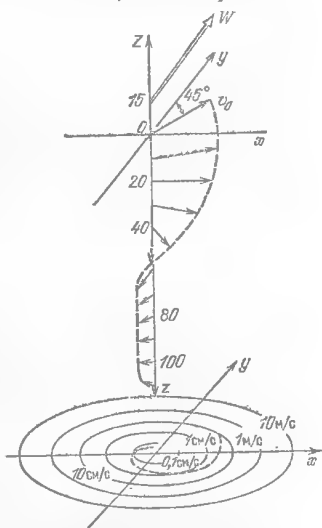


Рис. 42. Спираль Экмана — ветровое течение глубокого океана.

При скорости ветра $W = 10$ м/с поверхностная скорость течения в океане порядка 0,1 м/с, а глубина, на которой течение поворачивает вспять, порядка 100 м. Число Рейнольдса океанской турбулентности при такой скорости ветра порядка 10^7 . Турбулентность эффективно перемешивает океан в поверхностном слое глубиной около ста метров, в этом же слое происходит основной перенос водных масс течениями.

Достоинство теории Экмана в том, что она дает разумную физическую картину и верную оценку характерных скоростей и глубин. Но это, конечно, очень идеализированная схема. Она не применима, в частности, вблизи экватора, где ускорение Кориолиса, а вместе с ним и параметр k обращаются в нуль. Но основное, что «мешает» построить теоретическое распределение океанских течений, это суша, континенты Земли.

Интересно оценить, чему равна кинетическая энергия всех океанских течений. Средняя скорость ветра на Земле уже была оценена, когда мы вычисляли кинетическую энергию атмосферы; это $W \sim 10$ м/с, поэтому характерная величина скорости течений океана есть $v_0 \sim 0,1$ м/с. Характерная глубина течений равна v_0/ω . Опуская все численные постоянные, умножим ее на площадь океанов порядка $R_\oplus^2$ и на плотность кинетической энергии течений $\rho_0 v_0^2$. Тогда для кинетической энергии океана получим

$$\rho_0 \frac{v_0^3}{\omega} R_\oplus^2 \sim 10^{18} \text{ Дж},$$

что довольно близко к подсчетам сумм энергий отдельных течений. Эта энергия на три порядка меньше, чем кинетическая энергия атмосферы, что и естественно, поскольку в основном ее океан от атмосферы и получает. Термохалинные течения, энергию которых сообщает непосредственно солнечное излучение, по сравнению с ветровыми менее интенсивны.

Теоретический расчет реальных течений мирового океана очень сложен. Нужно учитывать и инерцию течения, отклоняемого берегами, и зависимость температуры и солености воды от глубины, и изменение направления ветра. Даже с помощью мощных вычислительных машин не удастся пока воспроизвести все особенности действительной карты течений в океанах.

Океанские течения отличаются от идеализированной схемы еще и тем, что им свойственно посредни океана образовывать узкие, шириной всего в сотни километров струи, текущие со скоростью до 2 м/с. Поток такой реки у наиболее мощных течений достигает одной десятой кубического километра в секунду. Но берегов у океанской реки нет, поэтому полса-

жение струй может меняться. Часто струя течения образует изгиб, перемещающийся по направлению течения. Такие изгибы течений называют меандрами. Возникло это слово от древнегреческого названия реки в Малой Азии, Майандрос, сейчас на картах она обозначена «с турецким акцентом» — Большой Мендерес. Течет она по рыхлому грунту и, размывая его, очень часто меняет свое русло.

Меандрируя, течение может раздваиваться, отщеплять отдельные струи, создавать в океане круговороты диаметром в несколько сот километров. Такой случайный круговорот медленно перемещается по океану и не исчезает долгое время, порядка года. Большие круговороты диаметром в тысячи километров свойственно образовывать и основным, стационарным течениям мирового океана.

Посмотрите на карту главных поверхностных течений водной оболочки Земли (рис. 43). Под влиянием пассатов в тропиках, в среднем на широтах $\pm 15^\circ$ образуются пассатные течения, направленные на запад. Если учесть, что на этих широтах ветер дует с северо-востока в Северном полушарии и с юга-востока в Южном, то видно, что уклонение поверхностного течения от ветра действительно близко к 45° , как требует теория Экмана. Между северным и южным пассатными течениями во всех океанах расположено экваториальное противотечение, направленное на восток. Ось его проходит в среднем градусов на пять севернее экватора — полной симметрии между Северным и Южным полушариями Земли нет. На глубине под пассатными течениями тоже существует обратный ток воды. Зная о спирали Экмана, мы уже не удивляемся его наличию. Экваториальное же противотечение можно считать выходом на поверхность экмановских глубинных противотечений там, где ветер слаб, а ускорение Кориолиса близко к нулю.

Если просуммировать по глубине потоки жидкости в спирали Экмана, то окажется, что полный поток направлен по оси x , прямо перпендикулярно направлению ветра! И полный поток каждого из пассатных течений, поток, просуммированный по глубинам, тоже направлен не точно на запад, но имеет составляющую, направленную от экватора. Для компенсации этих оттоков на экваторе происходит подъем глубинных

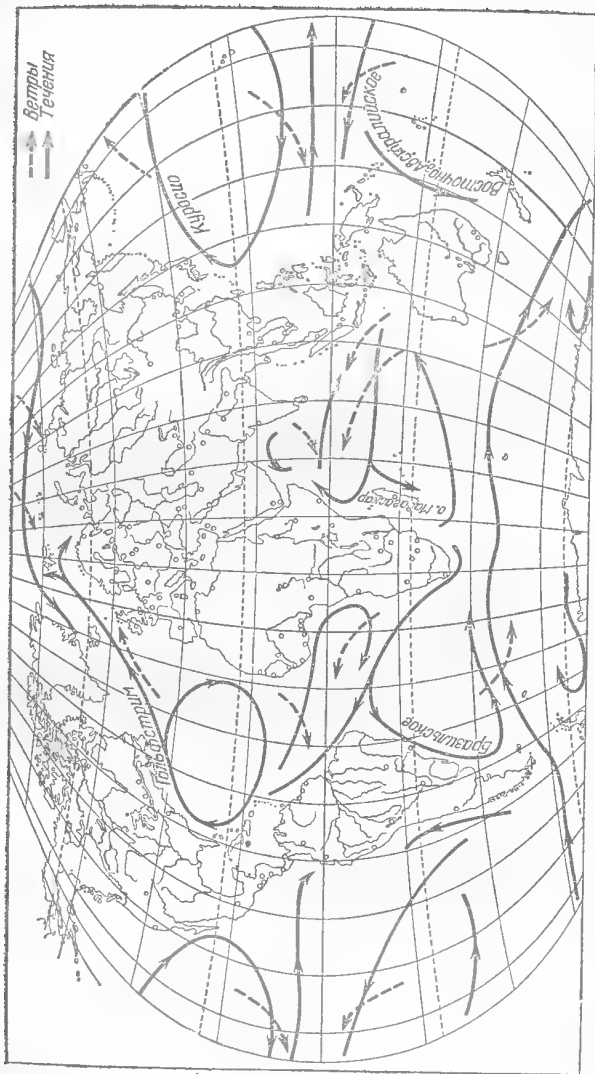


Рис. 43. Главные течения мирового океана. Пунктир — направления ветров.

вод. Поскольку на глубине вода холодная, то температура поверхностных вод на экваторе оказывается на 2—3 градуса холоднее, чем температура соседних тропических вод. Экваториальная область океанов — относительно холодное место нашей планеты! Медленный подъем океанских вод в специальной литературе называют апвеллингом, опускание — даунвеллингом, не переводя соответствующие английские слова *upwelling* и *downwelling*. Кроме экваториального апвеллинга, подъем или опускание вод

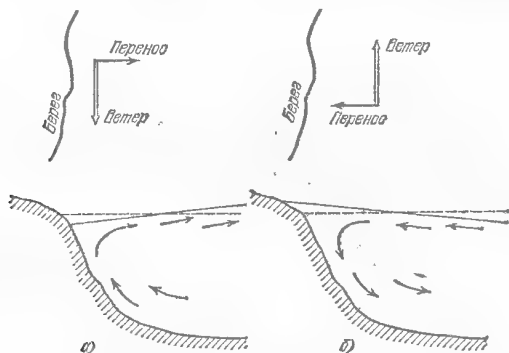


Рис. 44. Схемы течений в прибрежной зоне в Северном полушарии; а) апвеллинг — подъем вод; б) даунвеллинг — опускание.

происходит у берегов больших водоемов при касательном к берегу направлении ветра. Примеры таких течений показаны на рис. 44. Это тоже проявление кориолисовых сил, направляющих полный поток жидкости, как и в спирали Экмана, перпендикулярно направлению ветра.

Когда пассатные течения подходят к шельфу — подводному краю континентов — им приходится и у поверхности поворачивать от экватора. Так начинаются мощные течения средних широт: Гольфстрим *) и Бразильское течения в Атлантике, Куро시오 и Вос-

*) Английское слово *Culfstream* означает «течение залива». Имеется в виду Мексиканский залив, от которого отходит Гольфстрим. По-японски «Куро шинва» означает «черный поток». Цвет вод и Гольфстрима, и Куро시오 темно-синий, отличный от цвета окружающих их вод.

точно-Австралийское течения Тихого океана, Мадагаскарское течение Индийского океана. Основная движущая сила этих течений уже не ветер, а напор воды у континентов. Уровень воды океана в Атлантике в Мексиканском заливе на 60 см выше, чем у Африки, а в Тихом океане разница уровней между западным и восточным его берегами достигает 70 см. Создается такой нагон пассатными ветрами. Но структура течений средних широт уже не ветровая: они прослеживаются в океане до глубины в полтора-два километра и только еще глубже можно обнаружить слабое противотечение.

Но и ветры, особенно на широтах $40-50^\circ$, тоже подгоняют, усиливают эти течения. К тридцатиградусным широтам они расположены континентов и силами Кориолиса отворачиваются на северо-запад, а на широтах $40-50^\circ$ начинают течь и прямо на запад. Вот тут-то их снова — взгляните еще разок на карту ветров — усиливают ветры, дующие с юго-востока в Северном полушарии и с северо-востока в Южном. Особенно мощным становится направленное на запад Антарктическое циркумполярное течение — вбирающее в себя течения средних широт всех океанов, почти не имеющее на своем пути континентальных препятствий и подгоняемое северо-западными ветрами.

Наконец, в Северном Ледовитом океане под действием северо-восточных ветров третьей, полярной ячейки Хэдли возникает почти круговое Западное Арктическое течение. В Южном полушарии у него есть слабый аналог у самого побережья Антарктиды.

Такова глобальная картина океанских течений, она логично следует из карты ветров и карты континентов. Но вот какой еще вопрос тревожит. Мы идем, — и ветры Земли, и течения океана значительно отклоняются вращением планеты, силами Кориолиса. Спрашивается, ну а ветры и течения сами как влияют на вращение Земли, не тормозят ли его?

Вопрос кажется очень сложным. Но ответ на него прост, — нет. И ветры, и течения вызваны падающим на Землю излучением Солнца. Оно дает энергию движениям атмосферы и океана. Эта энергия диссипи-

руется, переходит в тепло, при этом действительно возникают силы трения. Однако эти силы — внутренние. Для каждой такой силы, замедляющей вращение планеты, по третьему закону Ньютона найдется равная и противоположно направленная сила, вращение Земли ускоряющая. Суммарный момент всех внутренних сил равен нулю. Солнечное излучение не изменяет момента количества движения Земли — ветры и течения в среднем не замедляют Землю и не ускоряют ее.

КЛИМАТ ЗЕМЛИ

1. Облака

Мы уже видели, как значителен вклад облаков в альбедо Земли — ее средний коэффициент отражения солнечных лучей. Но влияние облачности на климат Земли не только в этом. Всем нам известно, как сильно связана с облачностью погода. Если бы ветер не переносил облака, то суша, континенты, оказались бы почти безводными. Ведь из облаков поступает большая часть осадков: дождь, снег, град. И, наконец, в тепловом балансе планеты облака играют не только отрицательную роль. Они, особенно ночью, как одеяло закрывают Землю, уменьшают ее радиационное охлаждение. Но что же такое облако?

«Облако — туман в высоте» — можно прочесть в толковом словаре В. Даля. Верно. А туман — с ним, наверное, каждый знаком непосредственно и на ощупь, — это взвесь мелких и мельчайших капелек воды.

Облако состоит из водяных капель, а вода тяжелее воздуха. Почему же облако не падает, не опускается все целиком? Что поддерживает его там, в высоте? И еще вопрос. Когда автомашина движется в тумане, водителю приходится включать стеклоочистители. Капельки тумана, сталкиваясь, медленно растут, падают вниз, осаждаются. То же самое должно происходить и в облаке. Почему же не из каждого облака идет дождь?

Давайте посмотрим сначала, как движется в воздухе одна капелька воды. Маленькая капля имеет сферическую форму, шариком ее делает поверхностное натяжение — сфера имеет минимальную поверхность при заданном объеме. Пусть радиус капли R , тогда объем ее равен $V = 4\pi R^3/3$, а масса — $\rho_0 V$. Вес капли $\rho_0 g V$ во много раз больше архимедовой силы $\rho_1 g V$, поскольку плотность воздуха ρ_1 гораздо меньше

плотности воды ρ_0 . Поэтому капля, на первый взгляд, должна падать с ускорением, почти равным g .

Но как только капля приходит в движение, появляется сила сопротивления, вязкая сила. Для сферических частиц ее называют еще силой Стокса, по имени английского физика Дж. Стокса, в 1851 году решившего задачу о движении вязкой среды вокруг сферы. Сила Стокса уравнивает силу тяжести, поэтому капля падает вниз не с постоянным ускорением, а с постоянной скоростью.

Сила Стокса — это сила сопротивления, пропорциональная вязкости воздуха $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с). Размерность силы можно составить произведением размерности вязкости на размерность скорости падения $[v] = \text{м/с}$ и на размерность радиуса капли $[R] = \text{м}$. Действительно, с точностью до численного коэффициента бл, который, конечно, методом размерности найти нельзя, сила Стокса и равна произведению $\eta R v$:

$$F_C = 6\pi\eta R v.$$

Приравнивая ее весу капли $\rho_0 g V = 4\pi R^3 \rho_0 g / 3$, легко найти зависимость скорости падения от размера капли:

$$v = \frac{2}{9} \frac{\rho_0 g R^2}{\eta}.$$

Проверим теперь, для каких размеров капель движение воздуха, обтекающее падающую каплю, будет ламинарным. Ведь формула сопротивления была получена Стоксом для ламинарного течения. Занимаясь возникновением течений в океане, мы выяснили, что узнать, будет ли течение ламинарным или турбулентным, можно, вычислив безразмерное число Рейнольдса $Re = R v \rho_1 / \eta$. В число Рейнольдса входит плотность воздуха ρ_1 , а не плотность воды ρ_0 потому, что обтекает каплю, движется именно воздух, а не вода в капле.

Если число Рейнольдса не превышает нескольких десятков, то течение ламинарно, формула Стокса справедлива и, следовательно, скорость падения капли действительно такова. Подставим скорость в выражение для числа Рейнольдса, приравняем его 10 — примерно таково критическое число Рейнольдса

ти о сферического тела — и найдем максимальный размер R_1 , при котором обтекание воздухом водяной капли еще ламинарно:

$$R_1 \simeq \left(\frac{45\eta^2}{\rho_0 \rho_1 g} \right)^{1/3} \simeq 0,01 \text{ см.}$$

Такая капелька, радиусом в 100 микронетров, падает со скоростью $v = 1,2 \text{ м/с}$.

При размере капли, большем критического, R_1 , обтекание капли становится турбулентным и сила сопротивления воздуха уже не выражается формулой Стокса. По порядку величины ее можно оценить, считая, как и в океане, турбулентную вязкость пропорциональной числу Рейнольдса. Тогда $F_{\text{сопр}} \sim \sim \rho_1 v^2 R^2$, и, приравнивая эту силу весу капли, получим скорость падения капли при размерах, больших R_1 :

$$v \sim \sqrt{\frac{\rho_0 g R}{\rho_1}}.$$

Заметьте, теперь скорость возрастает с увеличением капли существенно медленнее, чем при ламинарном обтекании.

Наконец, при дальнейшем увеличении размера капли вступают в игру новые эффекты. Оказывается, что большую каплю поверхностное натяжение воды $\sigma_0 = 7,2 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}^2$ уже не может удержать в форме сферы. Сравним силу турбулентного сопротивления $F_{\text{сопр}}$ и силу поверхностного натяжения $\sigma_0 R$. Они окажутся одинаковыми по порядку величины при размере капли, равном

$$R_2 \sim \sqrt{\frac{\sigma_0}{\rho_0 g}} \sim 0,3 \text{ см.}$$

Капли такого размера сплюсциваются набегающим потоком воздуха. Затем, с ростом радиуса, капля принимает неправильную, изменяющуюся в падении форму, и, наконец, при размерах в несколько R_2 воздух разрывает каплю пополам.

Итак, при радиусах капли, превышающих 0,3 см, капли разваливаются, при $0,01 \text{ см} < R < 0,3 \text{ см}$ падают со скоростью, пропорциональной $\sqrt{R}$, а при $R < 0,01 \text{ см}$ скорость падения пропорциональна R^2 .

Однако и это еще не полная картина. Совсем маленькие капельки облака ведут себя иначе. Они не

падают. Или, точнее, почти не падают. Для частиц размером в доли микрометра, из которых состоят легкие облачка, падением в поле тяжести можно пренебречь по сравнению с интенсивным брауновским движением *).

Представьте себе очень маленькую каплю, но все же размером, гораздо большим молекулярного. Окружающие ее молекулы воздуха с массами $m \sim \mu/N_A \sim 5 \cdot 10^{-26}$ кг движутся со скоростями порядка $v \sim \sqrt{kT/m} \sim 300$ м/с. Под их ударами капля хаотически перемещается.

Средняя кинетическая энергия молекул воздуха при температуре T по порядку величины равна kT . В результате многочисленных столкновений молекулы обмениваются энергией между собой и сообщают энергию капле. При этом выполняется закон равнораспределения — средняя кинетическая энергия капли оказывается тоже порядка kT . Отсюда легко оценить среднеквадратичную скорость брауновского движения капли с массой порядка $\rho_0 R^3$:

$$v \sim \sqrt{\frac{kT}{\rho_0 R^3}}.$$

Брауновская скорость зависит от размера капли как $R^{-3/2}$, а скорость падения малых капель растет как R^2 . Эти скорости становятся одного порядка величины при размерах капель порядка

$$R_0 \sim \left(\frac{kT\eta^2}{\rho_0^3 g^2} \right)^{1/7} \sim 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$$

Капельки с размерами, меньшими нескольких микрометров, — брауновские, они движутся быстро, хаотически, во все стороны. Капли, с радиусами, большими R_0 , опускаются вниз. Самые медленные капли имеют размеры около микрометра и скорости порядка 0,03 см/с. Скорости капель воды в воздухе во всем диапазоне их размеров показаны на рис. 45.

В реальном облаке присутствуют капли разных размеров. Они перемещаются, сталкиваются, сливаются, растут. Брауновские капельки при столкно-

*) Его открыл в 1828 году английский ботаник Р. Браун (Brown). В русском языке его фамилия иногда передается как Броун.

вениях растут довольно медленно. Их образование, рост или испарение определяется не столько частотой их столкновений, сколько влажностью и температурой воздуха.

Существует для каждой жидкости зависимость концентрации ее насыщенных паров от температуры. Для водяного пара она изображена на рис. 46. Если температура влажного воздуха, содержащего, скажем, 10 г влаги в кубометре, опускается ниже 11°C , то водяной пар становится

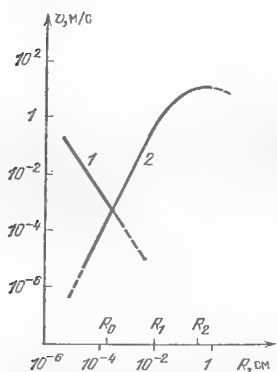


Рис. 45. Скорость движения водяных капель в зависимости от радиуса: 1 — брауновское движение; 2 — падение.

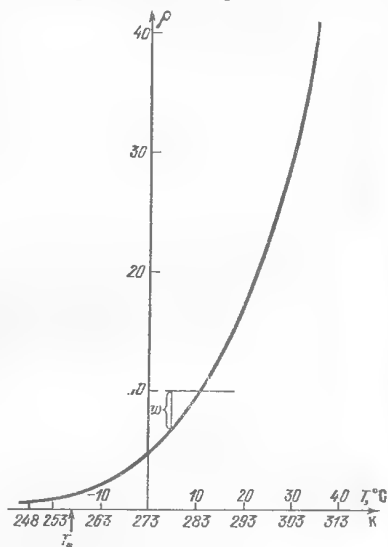


Рис. 46. Плотность (ρ , г/м³) насыщенного водяного пара. Изменение влажности и водности воздуха.

насыщенным. При дальнейшем охлаждении этой воздушной массы в виде пара в нем останется лишь столько влаги, сколько позволяет кривая рис. 46, а вся остальная вода сконденсируется.

Этот конденсат в виде мельчайших капелек воды в воздухе и образует туманы и облака. Масса капельной или замерзшей воды в единице объема воздуха называется водностью облака w . Водность белых облачков невелика, а у грозowych туч она достигает значений 3—5 г/м³.

Но вот капля превысила размер R_0 и начала опускаться вниз. Теперь она растет уже за счет столкновений с другими маленькими капельками, а с ростом размера растет и скорость падения, и сечение захвата малых капель. За время dt капля пройдет путь $dz = vdt$ и на этом пути заметет объем $\pi R^2 v dt$. Будем считать, что она соберет все малые капли в этом объеме. Умножим его на водность облака w и узнаем, насколько возрастет масса капли:

$$dm = 4\pi\rho_0 R^2 dR = w\pi R^2 dz = \pi R^2 w v dt = \frac{2\pi}{9} w \frac{\rho_0 g R^4}{\eta} dt.$$

Для последнего равенства использована стоксова скорость падения капли. Второе и пятое выражения этой цепочки равенств дают уравнение роста капли, уравнение зависимости ее радиуса от времени. Из него нетрудно видеть, что почти все время созревания капли τ от малого, брауновского размера R_0 , до больших размеров $R \geq R_0$ занимает самый начальный период роста. При постоянной водности вдоль пути капли время ее созревания будет равно

$$\tau = \frac{18\eta}{wgR_0} \simeq \frac{6 \text{ часов}}{w [\text{г/м}^3]}.$$

Оно не зависит от конечного размера капли! Однако 6 часов жизни — это маловато для облака с водностью порядка 1 г/м³. Из таких облаков дождь, как правило, не выпадает. В чем же дело?

Посмотрите на второе и третье выражение той же цепочки равенств. Они показывают, на сколько вырастает капля при ее опускании на dz . Независимо от скорости капли, независимо от того, ламинарно она падает или турбулентно, ее размер растет как

$$\frac{dR}{dz} = \frac{w}{4\rho_0}.$$

Поэтому только в мощном облаке с высокой водностью и может вырасти крупная дождевая капля с размером, близким к R_2 . Даже если средняя водность облака равна, скажем, 3 г/м³, все равно, толщина облака должна быть не меньше, чем

$$\Delta z = \frac{4\rho_0}{w} R_2 = 4 \text{ км!}$$

Если же толщина облака недостаточна, то и конечный размер капель будет так мал, что они успеют испариться, не достигнув земли. Вот и ответ на вопрос, почему не из каждого облака идет дождь. Нужны специальные условия, чтобы образовалось облако многокилометровой высоты.

Но какие именно условия? И что вообще определяет верхнюю и нижнюю границы облаков?

Вспомните «слоеный пирог» атмосферы. Пары воды не пропускают инфракрасное тепловое излучение поверхности Земли. Поэтому тепловую энергию в космос излучают верхние слои тропосферы, где паров воды уже немного, — почти вся она уже сконденсировалась и вымерзла ниже, в облаках. На верхней границе облаков температура примерно равна радиационной температуре Земли $257\text{ К} = -16^\circ\text{С}$, и даже насыщенный водяной пар с плотностью при этой температуре, равной $1,27\text{ г/м}^3$, уже прозрачен для теплового излучения. Кроме того, плотность воздуха, а вместе с ним и водяного пара быстро падает с подъемом. Поэтому верхняя граница облаков определяется общим содержанием влаги в воздухе и проходит примерно там, где инфракрасная прозрачность насыщенного водяного пара становится настолько малой, что пропускает в космос тепловое излучение.

Вниз же в облаке температура растет. С ростом температуры очень быстро возрастает концентрация насыщенных паров. Поэтому на некоторой высоте температура становится достаточной для испарения всей капельной воды облака, его водность обращается в нуль. Нижняя граница облаков определяется точкой росы — той точкой на графике рис. 46, где прямая концентрации влаги в нижней части облака пересекает кривую концентрации насыщенного пара.

Облака бывают двух основных видов. Одни называются по-латыни *stratus*, т. е. «слоистые». Слоистые облака образуются при охлаждении малоподвижных воздушных масс. Обычно это происходит ночью, когда верхняя граница облака отдает тепловое излучение в космос. Другая причина их образования — это движение теплой влажной массы воздуха над холодной поверхностью земли или над холодной воздушной массой. Туман — это и есть слоистое облако, у которого нижняя граница лежит непосредст-

венно у земли или моря. Дождь из слоистых облаков, если и идет, то мелкий, моросящий, — для образования крупных капель слоистым облакам не хватает толщины.

Другой вид облаков — кучевые, по-латыни *cumulus*, что означает «холм», «груда». Кучевые облака — результат конвекции богатого влагой воздуха. При конвективном подъеме воздух адиабатически охлаждается, и на некоторой высоте его влажность становится насыщенной. Это и есть нижняя граница кучевого облака. Но хотя сама эта граница почти неподвижна, воздух постоянно проходит через нее. Подымается воздух и в самом облаке, все более охлаждаясь и конденсируя свою влагу. У верхней границы облака воздух, охлажденный и оставивший всю воду в облаке, растекается в стороны и опускается вниз вокруг кучевого облака. Именно поэтому кучевые облака часто имеют вид белых барашков, окруженных безоблачными промежутками. А если вы смотрели на большое кучевое облако сверху, пролетая над ним на самолете, то могли видеть запоминающуюся картину правильного расположения конвекционных ячеек — или ровными рядами, или отдельными холмами, возвышающимися почти в шахматном порядке. Верхняя часть кучевых облаков обычно состоит не из капель, а из кристаллов льда.

Мощная конвекция рождает тучу, грозовое кучевое облако. Его обычная высота 7—10 км, а в исключительных случаях и всегда у экватора она достигает 12—15 км. Структура тучи сложнее, в ней есть и восходящие, и нисходящие потоки воздуха. Вниз воздух увлекают падающие льдинки и капли дождя.

Этими двумя видами облаков, слоистыми и кучевыми, их классификация не исчерпывается. Есть смешанные виды облаков и еще один независимый вид — перистые облака. По-латыни они называются *cirrus*, что значит «локон», «завиток». Перистые облака состоят из мелких кристалликов льда, они образуются на большой высоте в быстрых турбулентных струях ветра.

Облака есть и на всех других планетах с мощными атмосферами. Ими полностью скрыты поверхности Венеры и Титана. А поверхности Юпитера и Сатурна и исчисляются от верхнего края облаков, поскольку

никакой другой твердой или жидкой поверхности у них нет. Разнообразен химический состав облаков других планет. Например, некоторые облака Венеры — это капельки серной кислоты!

Можно считать, что механизмы образования облаков на других планетах сходны с земными. Только

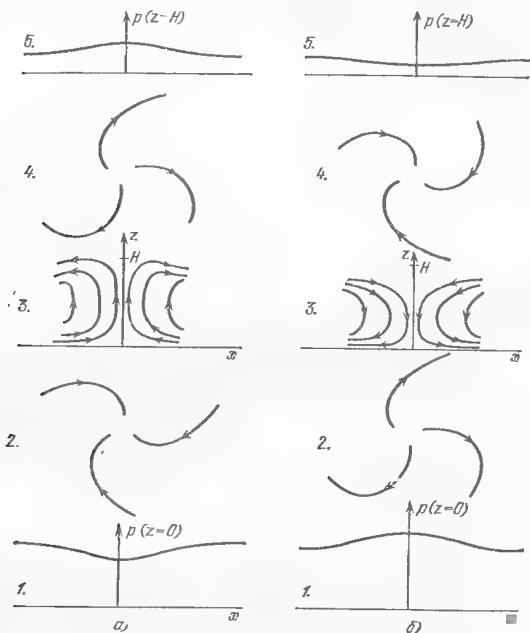


Рис. 47. Схемы циклона (а) и антициклона (б): 1 — давление у поверхности; 2 — направления поверхностных ветров; 3 — вертикальный разрез; 4 — направления высотных ветров; 5 — давление верхней тропосферы.

надо иметь в виду, что образование облаков может вызывать не только конденсация капелек и кристаллов, но и химическая реакция. Лабораторный пример такой возможности — образование облачка из кристалликов хлористого аммония NH_4Cl над поставленными рядом сосудами с соляной кислотой HCl и с нашатырным спиртом, раствором аммиака NH_3 .

Облака на Земле — существенная черта и отражение земной погоды. Как правило, мощная облачность располагается над теми местами, где давление

у поверхности низкое. Туда стремятся, закручиваясь кориолисовыми силами, поверхностные ветры (рис. 47). В центре такого циклона *) воздух поднимается вверх и, охлаждаясь, образует облака. В верхних слоях атмосферы циклона, над областью пониженного давления, напротив, давление атмосферного воздуха выше (!) среднего, характерного для данной высоты. В верхней тропосфере воздух, гонимый избыточным давлением, расходуется от центра циклона.

Антициклоном называется область повышенного атмосферного давления у поверхности. В антициклоне сухой воздух опускается из верхней тропосферы. Поэтому над теми местами, где находится антициклон, безоблачное, ясное небо.

Циклоны и антициклоны имеют размеры от 200 до 3000 километров в поперечнике и среднее время жизни около недели. Однако некоторые из них очень длительное время располагаются в одном и том же месте. Есть на Земле один постоянный циклон, и летом, и зимой стоящий около Исландии. Он рожден встречей теплых вод Гольфстрима с холодным полярным воздухом. Над всей Исландией облачное небо. Зимой погоду нашей страны во многом определяет Сибирский антициклон. Главную роль в его формировании играют Гималаи, не пропускающие на север влажный воздух Индийского океана. Большинство аномалий давления все же перемещается — в общих чертах так, как изображены на рис. 38, а направления глобальных ветров Земли.

Число циклонов и антициклонов по всей Земле в каждый момент времени примерно одинаково. Облачность закрывает около половины поверхности нашей планеты.

2. Что такое погода, что такое климат

Из обыденной жизни всем хорошо известно, что такое погода и климат. Какая сегодня погода? — Вы смотрите за окно, не идет ли дождь или снег, смотрите на термометр, слушаете сводку погоды по радио и одеваетесь соответственно. Климат — это тоже ясно: на севере климат холодный,

*) Греческое слово «киклон» означает «кольцо змей».

а в тропиках жарко во все времена года. Но нам придется немного уточнить эти интуитивные представления.

Погода есть состояние атмосферы и земной поверхности (суши, океана) в данный конкретный день и час по всей планете. Обычно мы описываем погоду в каждом месте Земли отдельно, характеризуем ее метеорологическими величинами. Это температура, давление и влажность воздуха у поверхности, скорость и направление ветра, состояние облачности, количество осадков и какие они. На сегодняшний день понятие погода Земли — это совокупность таких данных по всем метеорологическим станциям, плюс фотографии облачности, сделанные со спутников.

К сожалению, эта информация не полна. И потому, что метеорологических пунктов маловато, особенно в океанах. И потому, что полная информация о погоде — это не несколько величин, измеренных у поверхности, а их зависимости по всему столбу тропосферы, нижнему слою атмосферы. С теоретической точки зрения достаточно всего двух зависимостей от высоты, например, температуры и влажности. Зная их, можно найти и все остальные физические величины: вычислить давление и плотность воздуха на любой высоте, определить нижнюю и верхнюю границы облаков, их водность, следовательно, узнать, идет ли дождь. Распределение давлений принципиально позволяет вычислить ветры на всех высотах, ветры и прогрев океана определяют его течения. Наконец, от движения воздушных и водных масс зависит погода завтрашнего дня.

Конечно, на самом деле, такой полной информации мы не имеем и, возможно, никогда иметь и не будем. Но если бы даже было известно достаточно точно состояние погоды, высотные зависимости по всей планете, мы не сумели бы с этой огромной информацией справиться, — наши вычислительные машины рассчитывали бы погоду намного медленнее, чем она меняется в природе. Но пусть даже создан компьютер, считающий с любой нужной скоростью. Можно ли будет предсказывать погоду с любой степенью точности, на любой срок вперед?

Нет. Точность предсказания будет очень хорошей при прогнозе на день вперед, вполне удовлетвори-

тельной — на неделю вперед, месячный прогноз совпадет приближенно, а через год отклонения прогноза от реальной погоды будут уже близки к отклонениям погоды от среднемноголетних климатических данных. Это не означает, что прогноз на длительные сроки вообще невозможен, но усилия на этом пути имеют свой предел. При любой точности расчетов расхожимость будет расти как корень квадратный из времени.

Это может показаться удивительным, ведь предполагалось, что о погоде было известно все и что счет велся как угодно точно. Но таково свойство уравнений гидродинамики. Как только движение становится турбулентным, его точный расчет на большое время вперед будет совпадать с реальной картиной только в среднем. А течения океана турбулентны, и для атмосферы число Рейнольдса порядка 10^{10} . Поэтому надо уметь правильно усреднять турбулентность ветров и течений Земли.

Климат и есть пример такого усреднения, усреднения не численных расчетов, а усреднения данных о погоде прошлого. Понятие о климате было введено еще учеными Древней Греции. Само это слово тоже греческого происхождения, оно означает «наклон». Греки понимали, что климат местности зависит от среднего наклона солнечных лучей.

Действительно, главную составляющую в климат каждой местности, в зависимость усредненной погоды от времени года, вносят условия согревания этого участка земной поверхности солнечными лучами, условия освещенности. Давайте посмотрим, как в течение года меняется освещенность земного шара на заданной широте. Для климата наиболее важно, сколько энергии приходит на единицу площади поверхности в целом за сутки. Но для того, чтобы это узнать, сперва нужно вычислить, как изменяется освещенность Земли в течение суток для каждого времени года, на каждой широте.

Несмотря на то, что такая задача кажется более сложной, поскольку узнать надо больше, она на самом деле стала проще. Ведь все, что нам надо сделать, это вычислить освещенность поверхности вращающегося шарика точечным источником света. Такая задача легко сводится к чисто геометрической.

Освещенность, т. е. световая мощность, попадающая на единичную площадку, как вам известно, обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника. Кроме того, она пропорциональна косинусу угла α между направлением на источник света и нормалью, перпендикуляром к площадке:

$$E = s_{\odot} \left(\frac{a_{\oplus}}{r} \right)^2 \cos \alpha.$$

Здесь $s_{\odot} = 1,36 \cdot 10^3$ Вт/м² — солнечная постоянная. По своему определению она и есть освещенность площадки, находящейся на расстоянии $a_{\oplus}$ от Солнца, его прямыми лучами. Только выражена солнечная постоянная не в люксах, световых единицах, а в единицах энергетических. Их можно перевести друг в друга с помощью соотношений:

$$1 \text{ лк} = 0,001471 \text{ Вт/м}^2; \quad 1 \text{ Вт/м}^2 = 679,6 \text{ лк}.$$

Расстояние до Солнца r в течение года меняется не очень значительно, при эксцентриситете 0,0167 перепад расстояний составляет 3,3%. Это означает, что различие в освещенности Земли в целом между ее положениями в перигелии и афелии — почти 7%. Это уже величина заметная. Мы учтем ее, когда будем вычислять суммарные энергии, получаемые различными широтами за день.

Главный вклад, однако, в изменение освещенности вносит изменение со временем угла наклона солнечных лучей. Угол между направлением на Солнце и вертикалью данного места сильно меняется и в течение дня, и день ото дня в течение года. Найдем поэтому в первую очередь зависимость $\alpha(t)$.

Нам будет удобно считать, что все углы задачи изменяются в широком диапазоне. При этом формула для освещенности, конечно, не верна при отрицательных значениях косинуса, т. е. когда $\pi/2 < \alpha < 3\pi/2$. Легко понять, это означает, что в данном месте в данное время просто ночь. При этом освещенность равна нулю.

Широту места будем отсчитывать, как обычно, от экватора, но для южных широт примем отрицательные значения φ . Географическая широта, таким образом, изменяется в пределах $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$. Долгота λ , как известно, отсчитывается от Гринвичского

меридиана. Ее тоже мы не станем разделять на долготы «к западу от Гринвича» и «к востоку от Гринвича». Поступим проще. Будем считать, что долгота λ меняется в пределах от 0 до 2π , от 0° до 360° , а положительное направление выберем на восток. Тогда, например, $\lambda = 2\pi/3$ будет означать 120° восточной долготы, а $\lambda = 3\pi/2$ — это 90° западной долготы.

Задачу о зависимости $\alpha(t)$ решим в два этапа. Найдем сперва, как в течение года меняется угол γ между осью вращения Земли и направлением к Солнцу. При этом земную орбиту приближенно будем считать окружностью. Посмотрите на рис. 48. Время t отсчитывать удобнее не от Нового года, а от момента зимнего солнцестояния. Тогда угол, который прошла Земля по орбите от этого момента, равен $2\pi t/T$. Период T здесь, конечно, равен тропическому году.

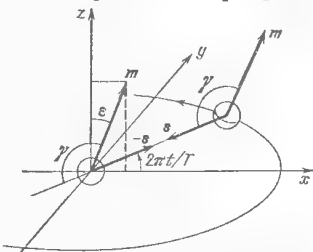


Рис. 48. К выводу формулы для угла между земной осью и направлением на Солнце.

Единичный вектор $\mathbf{s}$ направления от Земли к Солнцу, как видно из рисунка, имеет компоненты $(-\cos 2\pi t/T, -\sin 2\pi t/T, 0)$.

Единичный вектор $\mathbf{m}$ направления земной оси наклонен под углом ϵ к оси z . Его проекция на оси координат равны $(\sin \epsilon, 0, \cos \epsilon)$. Косинус угла между двумя единичными векторами равен их скалярному произведению, сумме произведений отдельных проекций:

$$\cos \gamma = (\mathbf{s}\mathbf{m}) = -\sin \epsilon \cos 2\pi t/T.$$

Проверим результат в частных случаях. Это убедит тех, кто еще не может понять его вывод.

1. $t = 0$; $\cos \gamma = -\sin \epsilon$; $\gamma = \epsilon + \pi/2 = 113^\circ,5$. Зимой земная ось, как видно из рис. 12 и 48, действительно составляет тупой угол с направлением на Солнце.

2. $t = T/4$ или $t = 3T/4$ — весеннее или осеннее равноденствия. При этом $\cos \gamma = 0$, земная ось перпендикулярна солнечным лучам.

*) Единичным называется вектор, у которого квадрат длины, т. е. сумма квадратов всех проекций, равен единице.

3. $t = T/2$ — летнее солнцестояние; $\cos \gamma = \sin \epsilon$, угол γ достигает минимального значения $66^\circ,5$.

Эта несложная формула дает зависимость $\gamma(t)$ с достаточной для нас точностью. Конечно, астрономические таблицы по ней составлять нельзя, — там надо учитывать эллиптичность земной орбиты, — но практическая ее ценность будет несомненна.

Посмотрим теперь, как изменяется наклон солнечных лучей в зависимости от времени суток и геогра-

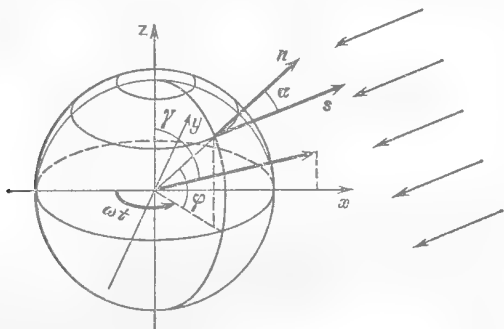


Рис. 49. К выводу формулы для угла освещения Солнцем участка земной поверхности на широте φ во время суток t .

фических координат, считая, что зависимость от времени года дается углом γ . Относительно Солнца Земля вращается с периодом, близким к 24 часам. На самом деле из-за неравномерности скорости Земли на ее эллиптической орбите солнечные сутки только в среднем равны $P_0 = 86\,400$ с. Например, в январе, когда Земля проходит афелий своей орбиты, солнечные сутки на 30 с больше, чем P_0 . Суммарные отклонения солнечного времени достигают 14 минут в феврале и 16 минут в другую сторону в октябре. Но для простоты мы пренебрежем этими колебаниями и будем считать, что относительно Солнца Земля вращается с постоянной угловой скоростью $\omega = 2\pi/P_0$.

Посмотрите на рис. 49. Допустим, нас интересует угол падения солнечных лучей на широте φ , на Гринвичском меридиане ($\lambda = 0$) в момент суток t по Гринвичу *). Это означает, что Земля повернулась на угол

*) Местное время суток принято отсчитывать от полнотчи. Полночь есть момент, отстоящий на 12 часов от момента наи-

ωt относительно положения, которое она занимала в полночь по Гринвичскому времени.

Единичный вектор направления на Солнце s составляет с осью z угол γ , его значение в любое время года нам уже известно. Поэтому проекции этого вектора на оси координат, выбранные так, как показано на рис. 49, равны $(\sin \gamma, 0, \cos \gamma)$.

Единичный вектор нормали к точке земной поверхности с географическими координатами φ и $\lambda = 0$ в момент суток t , как видно из рис. 49, имеет компоненты

$$n = (-\cos \varphi \cos \omega t, -\cos \varphi \sin \omega t, \sin \varphi).$$

Составляем скалярное произведение векторов s и n . Его значение равно косинусу интересующего нас угла падения солнечных лучей:

$$\cos \alpha = (ns) = \cos \gamma \sin \varphi - \sin \gamma \cos \varphi \cos \omega t.$$

Проверим теперь эту формулу для разных частных случаев.

1. В полночь $t = 0$, поэтому $\cos \alpha = -\sin(\gamma - \varphi)$. Почти для всех широт косинус оказывается отрицательным. Это и означает, что в полночь земная поверхность, как правило, не освещена. Однако для некоторых широт и в полночь возможно $\cos \alpha > 0$. Там — полярный день. Граница полярного дня определяется условием касательного падения солнечных лучей в полночь, т. е. $\alpha = 90^\circ$. Широта φ_1 , на которой наступает полярный день, определяется уравнением $\sin(\varphi_1 - \gamma) = 0$. У этого уравнения два решения в доступной области изменения углов:

$$\varphi_1 = \gamma \quad \text{и} \quad \varphi_1 = -\pi + \gamma.$$

Легко убедиться, что эти условия действительно дают верные граничные широты полярного дня: первое — для Северного полушария летом, второе — для Южного полушария между осенним и весенним равноденствиями.

2. Посмотрим теперь, каков наклон солнечных лучей в полдень, когда $\omega t = \pi$. При этом $\cos \alpha =$

высшего положения Солнца над горизонтом, от полудня. Восход и заход Солнца отстоят от полноты практически на одинаковые промежутки времени,

$= \sin(\gamma + \varphi)$. Решение этого уравнения $\alpha = \gamma + \varphi - \pi/2$ имеет достаточно общий вид — нас не смущают отрицательные значения α . Но если отрицательным становится $\cos \alpha$, то это означает ночь. Ночь в полдень есть полярная ночь. Ее граничная широта φ_2 тоже легко находится решением уравнения $\sin(\gamma + \varphi_2) = 0$:

$$\varphi_2 = -\gamma \quad \text{и} \quad \varphi_2 = \pi - \gamma.$$

Первое выражение справедливо в Южном полушарии, второе — зимой Северного полушария.

3. А как найти продолжительность дня и ночи на любой широте, в любое время года? Моменты восхода и захода Солнца даются условием $\cos \alpha = 0$. Продолжительность ночи есть удвоенное время восхода, следовательно,

$$\Delta t_{\text{ночи}} = \frac{P_0}{\pi} \arccos(\operatorname{tg} \varphi \operatorname{ctg} \gamma).$$

Если ответ не превосходит длительности суток P_0 , то остаток $P_0 - \Delta t_{\text{ночи}}$ и есть долгота дня. В противном случае ночь — полярная. Если же под аргументом арккосинуса оказывается число, большее единицы, это означает, что вы попали в полярный день.

4. Посмотрим, что происходит в дни равноденствий, когда $\gamma = \pi/2$. Тогда $\cos \alpha = -\cos \varphi \cos \omega t$. Отсюда видно, что восход наступает в 6 часов утра, продолжительность дня составляет 12 часов на всех широтах. День равен ночи. Заход Солнца — в 18 часов *).

5. А теперь переместимся на экватор, положим $\varphi = 0$. Тогда

$$\cos \alpha = -\sin \gamma \cos \omega t.$$

Смотрите внимательно: продолжительность дня на экваторе ровно 12 часов независимо от времени года. В полдень в равноденствие на экваторе солнечные лучи падают вертикально.

Вы можете сами исследовать формулу и в остальных интересных частных случаях: в моменты солнцезахода

*) Сравнивая вычисления по этой формуле с данными календарей, надо помнить не только об оговоренных ее неточностях, но и то, что в календарях восход и заход указывают не по центру солнечного диска, а по верхнему его краю. Это увеличивает продолжительность дня больше, чем на 2 минуты.

стояний, на широтах тропиков, на широтах полярных кругов. Мы несколько отвлеклись от климатических задач, но чтобы уж закончить с этой формулой, надо отметить, что она справедлива не только для нулевой долготы. Выбор ее на Земле именно на Гринвичском меридиане с физической точки зрения ничем не обусловлен. Исторически именно в Великобритании изменение долготы по солнечному времени было поставлено на научную основу, а в Гринвиче помещается главная обсерватория Англии. Та же самая формула справедлива, конечно, и для любой другой долготы, если подставить в нее местное время. Оно отсчитывается от момента, когда в данном месте астрономическая полночь. Ясно, что местное время t_m есть время по Гринвичу плюс время, нужное Земле для поворота на угол, равный долготе места:

$$t_m = t + \frac{\lambda}{\omega} = t + \lambda \frac{1 \text{ час}}{15^\circ}.$$

Для удобства общения людей, живущих недалеко друг от друга, было введено поясное время. Это — местное время, но округленное так, чтобы его отличие от Гринвичского составляло целое число часов. Вся поверхность Земли разделена на 24 часовых пояса. Их границы в океанах проходят по меридианам с долготами $\lambda_n = 7^\circ,5 + n \cdot 15^\circ$, где n — целые числа. На суше границы часовых поясов проведены по границам государств, рекам, горным хребтам или малонаселенным местам.

Долгота, например, Москвы равна 37° . Поэтому местное время в Москве опережает Гринвичское на $37^\circ/15^\circ$ часов, т. е. на 2 часа 28 минут. Москва действительно находится во II часовом поясе. Московское время, однако, отличается от Гринвичского не на 2 часа. Разность времен составляет 4 часа летом, с 1 апреля по 1 октября, и 3 часа зимой. Аналогичные сдвиги времени введены по экономическим причинам во многих странах мира.

Вернемся к освещенности Земли Солнцем. Теперь мы знаем, как зависит угол падения солнечных лучей от времени года, времени суток и широты места. Поэтому можно подсчитать, как распределяется поток солнечной энергии по поверхности Земли в среднем за сутки. Из-за большой теплоемкости земной

поверхности, особенно ее участков, покрытых водой, остывание за ночь относительно невелико. Поэтому солнечная энергия, поступающая за сутки, является важнейшей характеристикой климата данной широты. Изменение ее со временем года диктует климатический ход смены сезонов.

Нам нужно усреднить формулу для косинуса угла падения по местному времени. Провести усреднение легко в случае полярного дня, тогда переменный второй член формулы в среднем дает нуль. Поэтому солнечная энергия, попадающая за сутки в области полярного дня, равна

$$Q = P_0 s_{\odot} \left(\frac{a_{\oplus}}{r} \right)^2 \cos \gamma \sin \varphi.$$

Для произвольной широты вычисления несколько сложнее — следует помнить, что ночная освещенность не отрицательна. Их могут проделать те, кто знаком с интегрированием. Приведем результаты в виде графиков — рис. 50 и 51. При их построении учтено и небольшое изменение расстояния до Солнца в течение года.

Обратите внимание на удивительный результат расчетов — как много энергии приходит летом к полярным областям: больше, чем к экватору, больше, чем к летнему тропику! Это не ошибка. Так происходит потому, что во время полярного дня продолжительность освещения — круглые сутки, а косинус угла падения не так уж и мал.

Заметьте еще, что июньская кривая на рис. 50 не симметрична декабрьской. А кривые рис. 51 для северных и южных широт не получаются друг из друга сдвигом на полгода. Происходит это оттого, что зимой (Северного полушария) мы ближе к Солнцу, чем летом. Напомним, что Земля сейчас проходит свой перигелий в начале января. В среднем за год, конечно, на участки, расположенные в северных широтах, приходится столько же тепла, сколько на такие же участки в южных, но по сезонам эта энергия распределена немного по-разному. Эта несимметричность вместе с неравномерным распределением суши и океана по полушариям приводит, как мы увидим позднее, к интересным и существенным особенностям климата Земли.

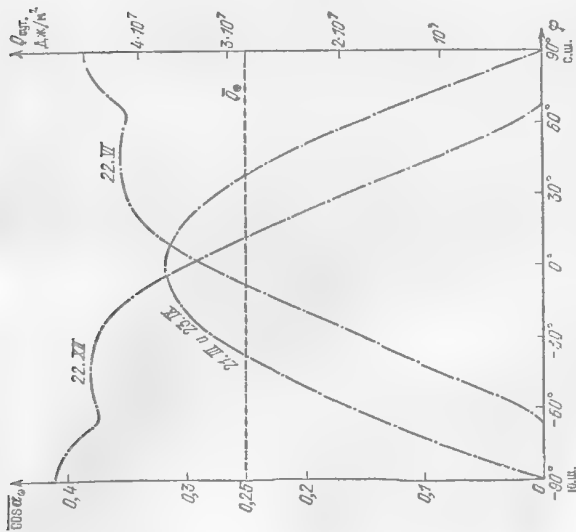


Рис. 50. Широтная зависимость суточной световой энергии, приходящей к Земле, в равноденствия и солнцестояния.

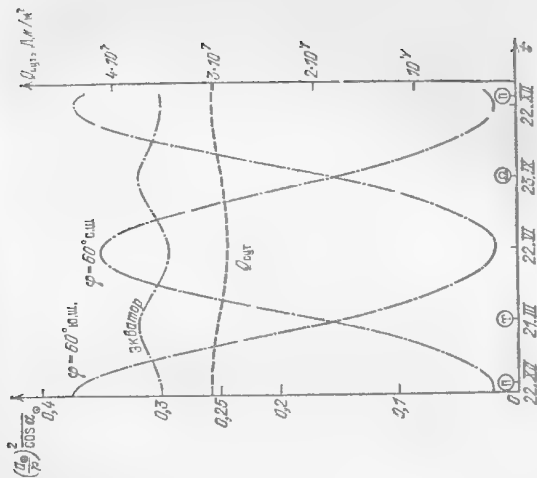


Рис. 51. Годовая зависимость суточной световой энергии, приходящей на экватор и широты 60°.

Изучая радиационное равновесие Земли в целом, по среднему потоку солнечной энергии мы вычислили среднюю температуру Земли, температуру ее излучения. На первый взгляд, и здесь, зная распределение солнечной энергии по широтам и временам года, можно было бы попытаться оценить равновесные температуры участков земной поверхности.

Сделать это, однако, не просто. Нужно учитывать сильное изменение альбедо земной поверхности с широтой. Альбедо, усредненный коэффициент отражения поверхности, тем больше, чем ближе к полюсам, как потому, что там больше снега и льда, так и потому, что атмосфера лучше отражает косые солнечные лучи, а на полярные области свет приходит касательно. Кроме того, видно и без вычислений, что такая оценка привела бы к результату, сильно отличающемуся от реальности. В приполярных областях во время длительной ночи солнечная энергия вообще не поступает, поэтому температуры их получились бы крайне низкими. Известно, что это не так. Температуры в Арктике и Антарктике во время полярных ночей только немного ниже радиационной температуры Земли — им еще весьма далеко до абсолютного нуля.

Легко понять, отчего это происходит. Относительно высокие температуры полярных широт зимой поддерживаются теплообменом, который постоянно происходит на планете. Тепловая энергия непрерывно переносится от тропических широт к полярным. Этот перенос осуществляется ветрами атмосферы и океанскими течениями. А сами ветры и течения вызываются, в конечном итоге, разностью температур между высокими и низкими широтами.

Посмотрим теперь, как в течение года на самом деле изменяются средние температуры некоторых широт Земли (рис. 52). Вы видите, что эти зависимости похожи на кривые рис. 51 — распределения световой энергии Солнца по географическим широтам. Однако температуры полярных областей во время полярной ночи действительно не становятся предельно низкими — тепловая энергия перераспределяется по поверхности Земли.

И еще, заметьте, минимумы и максимумы температурных кривых примерно на месяц запаздывают

по сравнению с экстремумами солнечной освещенности. Происходит это из-за тепловой инерции океана, суши и атмосферы, их теплоемкости.

Самая большая теплоемкость у океана. Мы уже знаем, что турбулентность и поверхностные течения перемешивают верхний слой океана на глубину, примерно равную $h \sim 100$ м. Удельная теплоемкость воды равна $c_0 = 4,18 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К). Поэтому полная

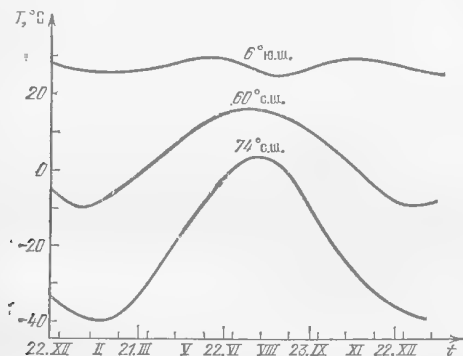


Рис. 52. Годовая зависимость средней температуры разных широт.

теплоемкость активного верхнего слоя океана, занимающего 70% поверхности планеты $4\pi R_{\oplus}^2$, есть

$$C_{\text{ок}} \simeq 0,7 \cdot 4\pi R_{\oplus}^2 h \rho_0 c_0 \simeq 1,7 \cdot 10^{23} \text{ Дж/К.}$$

Посмотрим, за какое время Δt солнечные лучи, освещающие Землю с мощностью $\pi R_{\oplus}^2 s_{\odot} = 1,75 \cdot 10^{17}$ Вт, прогреют океан, скажем, на $\Delta t = 3$ градуса:

$$\Delta t \sim \frac{C_{\text{ок}} \Delta T}{\pi R_{\oplus}^2 s_{\odot}} \sim 3 \cdot 10^6 \text{ с} \sim 1 \text{ месяц.}$$

Оценка, как видно из рис. 52, действительно дает значения, близкие к реальным: запаздывание температур по сравнению с освещением составляет примерно месяц, а месячный прирост температуры весной в средних широтах около 3 градусов.

Сегодня под словом климат подразумевается понятие более широкое, чем вкладывалось в это слово древними греками. Климат Земли — это вся совокупность

усредненных по времени погодных данных — температуры, давления, влажности, направлений ветров и течений — во всех точках планеты для каждого дня года. Но возникает вопрос, по какому временному интервалу следует усреднять погоду, чтобы получить характеристику климата.

Будем для определенности говорить о температуре. Можно усреднить температуры по промежутку, малому по сравнению с временами года, по такому, за который условия освещенности Солнцем не успевают измениться значительно. Обычно в качестве такого срока выбирается декада, треть месяца. Средние температуры декад уже обнаруживают регулярный ход, близкий к кривым рис. 52.

Однако если сравнить эти средние декадные температуры за разные годы, то они не совпадут точно, их расхождение может достигать десятка градусов. Если же взять их среднее значение, допустим, за десять лет, то такое же среднее за другое десятилетие будет отличаться от первого всего на несколько градусов. Давайте усредним температуры за еще более долгий период, за треть столетия. Мы увидим, что близость таких средних еще более возрастет, размах их отклонений станет еще меньше.

Возьмем тогда средние за 100 лет. Тут возникнет новое понятие. Отличия соседних столетних от средних все равно сохранятся, они не станут меньше долей градуса. Однако о них мы говорим так: это медленно изменяется климат.

Почему же отклонения средних декадных температур от климатического хода рассматриваются как случайные, как погодные флуктуации, а колебания столетних и тысячелетних погодных величин считаются изменениями климата? А потому, что изменения даже десятилетних средних в разных местах Земли имеют разный знак и сумма этих отклонений по планете очень близка к нулю. А вот столетние средние имеют уже почти одинаковый ход по всей Земле. Например, в XVI—XVII веках было на несколько градусов холоднее, чем сейчас, а в XI—XII веках немного теплее, причем на всей планете целиком. Это и есть причина того, что изменения вековых средних приписываются изменению климата, а сам климат считается глобальной характеристикой.

Интересно, что промежуток времени, в течение которого климат можно считать постоянным, примерно совпадает с продолжительностью человеческой жизни. Поэтому при интуитивном подходе погода рассматривается, как нечто колеблющееся около постоянной синусоиды времен года, около неизменного климата. Заметить изменчивость климата удалось только науке.

Первое свидетельство того, что в истории Земли были длительные очень холодные периоды, дало изучение ледников. Снег, выпадающий высоко в горах, не тает даже летом. Уплотняясь, он образует лед. Этот лед под действием собственного веса начинает стекать по горным ущельям, как река, только в миллионы раз медленнее. Скорость течения ледников — сотни метров в год, несколько метров в сутки. Ледник переносит с собой камни, обломки горных пород. Спускаясь в долину, ледник тает, а поскольку с гор постоянно поступают новые массы льда, то конечное положение ледника годами сохраняется примерно на одном уровне.

У своей оконечности ледник откладывает груды перенесенных им окатанных валунов. Эти отложения называют конечными моренами. Их невозможно спутать с иными геологическими образованиями. По положению конечных морен можно узнать, насколько далеко распространялся язык ледника в прошлом.

Оказалось, что вокруг Альп прослеживается несколько контуров конечных морен, расположенных значительно ниже современных оконечностей ледников. Впоследствии конечные морены, близкие по возрасту альпийским, были найдены и на Среднерусской возвышенности, и в Северной Европе, и в Северной Америке. Так, 125 тысяч лет назад ледник, начинавшийся в Скандинавии, откладывал конечную морену недалеко от Москвы, а 250 тысяч лет назад ледник заходил по Днепру ниже Киева.

Обнаружено несколько десятков ледниковых периодов в истории Земли. Повторяются они нерегулярно, промежутки между ними колеблются от 40 тысяч до нескольких сот тысяч лет. Между ледниковыми периодами климат возвращался более или менее к современному состоянию. Последний же ледниковый период

отложил свои конечные морены всего 20 тысяч лет назад.

Но есть ли уверенность в том, что оледенение наступало одновременно по всей планете, действительно ли конечные морены — свидетели изменения климата Земли? — Да. Общая масса льда, собиравшегося в ледниках суши, была очень велика, его объем вдвое превышал объем современных ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии. Вся эта вода изымалась из мирового океана. Поэтому уровень его многократно падал более, чем на 100 м ниже современного. Это подтверждается независимыми геологическими данными.

Сейчас уровень мирового океана меняется сравнительно медленно. Последние 6 тысяч лет отклонения уровня от современного не превышало 3 м. С начала XX века воды в океане прибавилось всего на 10 см. Эти колебания, конечно, тоже связаны с изменениями ледникового покрова, но в целом, сравнивая их с огромными перепадами уровня океана в прошлом, мы можем считать климат последних 6000 лет, климат нашей цивилизации, постоянным.

Но можно ли ожидать ледниковых периодов в будущем?

3. Причины изменения климата

Климат меняется не в отдельных районах Земли, но одновременно по всей планете. Поэтому и причина его изменения тоже должна быть глобальной, воздействующей целиком на всю Землю. Из всего предыдущего должно быть ясно, что самый главный вклад в формирование климата вносит тепловое равновесие планеты. Равенство потоков световой энергии Солнца, поглощаемой Землей, и уходящего от нее инфракрасного теплового излучения позволяет вычислить радиационную температуру Земли:

$$T_{\oplus} = T_{\odot} \sqrt{\frac{R_{\odot}}{2a_{\oplus}}} (1 - A)^{1/4}.$$

Она меньше, чем средняя температура земной поверхности, но все же близка к ней, определяет ее вместе с тепловым равновесием тропосферы.

Посмотрим внимательно, какие из множителей этой формулы могут изменяться и насколько быстро. Радиус $R_{\odot}$ и температура $T_{\odot}$ поверхности Солнца вошли в формулу из светимости $L_{\odot}$ — световой мощности Солнца. Ее изменение может быть связано с эволюцией состава ядерного горючего. Характерное время этого процесса было оценено; оно очень велико, порядка 10^{10} лет. Но и небольшие возмущения в процессе ядерного синтеза должны сглаживаться тепловой инерцией Солнца, время любого изменения их больше, чем 10^7 лет.

Мы знаем, что на поверхности Солнца происходят и относительно быстрые нетепловые, неравновесные процессы, природа которых до конца неясна. Однако эта солнечная активность изменяет только ультрафиолетовый конец спектра Солнца, вносящий всего около 1 % в его светимость. Кроме того, воздействие солнечной активности на климат, на динамику тропосферы, должно сильно ослабляться экзосферой, внешним слоем атмосферы Земли. Экзосфера поглощает это нетепловое излучение Солнца. И действительно, статистика показывает, что погода Земли не имеет 11-летней периодичности, характерной для солнечной активности.

Среднее расстояние от Солнца до Земли, большая полуось орбиты, не возмущается притяжением других планет. Мыслимое изменение ее связано только с уменьшением массы Солнца. Но и этот эффект ничтожен: Земля удаляется от Солнца всего на сантиметр в год, следовательно, характерное время, через которое удаление ее существенно проявится, — это 10^{13} лет.

Наконец, альбедо Земли, A , изменчиво ли оно? — Да, безусловно. Ведь величина A определяется коэффициентами отражения атмосферы, океана и суши. Наиболее сильно отражают свет облака атмосферы и снежный покров, ледники суши и плавающий лед моря. Но сами-то они зависят не только от климата, но даже от погоды и от времени года! Получается, что климат может воздействовать сам на себя, выходит, что его изменение зависит от собственного его состояния в данный момент.

Воздействия такого рода могут быть двух принципиально различных типов. Вот пример: маятник. Его малое отклонение вызывает возвращающую силу. Ускорение маятника направлено против смещения. Равновесие маятника — устойчиво. Но перевернем его вверх ногами, так чтобы точка подвеса оказалась под центром масс. Это тоже равновесие, но неустойчивое: малое отклонение вызовет силу, ускоряющую маятник от положения равновесия.

Система океан — атмосфера — суша намного сложнее маятника. Но по крайней мере одна из ее неустойчивостей видна сразу. Пусть произошло небольшое похолодание климата. Оно приведет к росту ледников, увеличению их площади. Поверхность снега и льда имеет высокий коэффициент отражения, 0,7—0,9. Поэтому альbedo Земли в целом увеличивается пропорционально похолоданию. Следовательно, тепловая мощность, согревающая планету падает, и она охлаждается еще больше.

И остальные элементы системы тоже вносят свой вклад в неустойчивость. В ледниковые периоды уровень океана опускается, поверхность его сокращается на площадь шельфа, т. е. примерно на 5%. Кроме того, его ледяной покров увеличивается. А ведь альbedo открытого океана мало, всего около 0,1, океан хорошо «впитывает» солнечную энергию. Таким образом, во время оледенения и океан дает меньший вклад в тепловой баланс Земли.

А атмосфера? При понижении температуры уменьшается испарение и падает насыщенная влажность воздуха. Поэтому в атмосфере уменьшается концентрация водяного пара. А именно водяной пар, в основном, и задерживает тепло у поверхности Земли, не дает ему сразу излучиться в космос. Другая малая примесь воздуха, способная поглощать инфракрасное излучение, это углекислота. Но с понижением температуры она начинает лучше растворяться в океанской воде, поэтому доля ее в атмосфере снижается, атмосфера становится еще более прозрачной для теплового излучения.

После всего сказанного становится неясно, отчего же Земля не пребывает в оледенении постоянно, каким чудом в течение уже 6 тысячелетий удерживается современный теплый климат. Ответ: есть и другие меха-

низмы равновесия. Они обеспечивают относительную устойчивость климата. Вот один из них. Океан и атмосфера Земли составляют большую тепловую машину. Конвекция движет ветры и течения. Понижение температуры в высоких широтах, где сосредоточена большая часть ледников, увеличивает перепад температур экватор — полюс. А если разность температур между нагревателем и холодильником тепловой машины растёт, то от этого увеличивается ее коэффициент полезного действия. Поэтому усиливается экваториальная конвекция и перенос тепла течениями от тропиков на север и на юг. Течения прогревают полярные области и климат возвращается в устойчивое состояние.

Но и ледниковый климат тоже относительно устойчив. Продолжительность каждого из ледниковых периодов составляла десятки тысяч лет. Трудно ответить на вопрос, как конкретно выходила Земля из оледенений. Известно, что таяние мощных ледников, покрывавших целиком весь север Европы, Азии и Америки, происходило относительно быстро, всего примерно за тысячу лет. Трудность ответа в том, что мы очень мало знаем, как во время оледенений были распределены ветры атмосферы и течения океана. Человечество каменного века не оставило нам свидетельств об этом, а интерпретация геологических данных не проста. Скоро, по-видимому, можно будет достаточно уверенно рассчитывать климат других эпох на вычислительных машинах.

Одна из возможностей того, как конкретно может климат перейти из ледникового состояния в теплое и наоборот, — это изменение схемы течений. Известно, что морские течения, меандрируя, могут на большие сроки, на десяток лет, изменять свое основное направление. Если такое событие произойдет с большим океанским течением, то изменение климата может быть весьма резким. Вот тому пример из истории планеты.

Шесть миллионов лет назад Гибралтарского пролива, отделяющего Средиземное море от Атлантического океана, еще не существовало. Средиземное море соединялось с Атлантикой более мелким проливом, называемым Рифским. Оставшаяся от него долина находится на территории современного Марокко. Ледниковые периоды, по-видимому, случались и тогда,

уровень океана тоже временами падал на сотню метров. И вот однажды при таком падении уровня Средиземное море оказалось отрезанным от мирового океана, превратилось в изолированный бассейн, вроде современного Каспийского моря. Расположено Средиземноморье чуть севернее полосы пустынь, опоясывающей сушу Земли. Поэтому испарение воды в море очень интенсивно — реки не смогли эту убыль воды восполнить. И все Средиземноморье высохло!

Дно его глубоководной части покрыла толща морской соли слоем в сотню метров. Реки, впадающие в Средиземное море, — Нил, Рона, По — прорезали в мягких подстилающих их породах каньоны (ущелья) глубиной в один-два километра и длиной до тысячи километров: и там, где они текут сейчас, и по дну бывшего моря. Впадали же они в маленькие пересыхающие соляные озера, расположенные на три километра ниже уровня океана.

Когда же ледники отступили, уровень океана снова поднялся, его воды стали перетекать по долине Риф. Мощный поток океанской воды быстро, за несколько сот лет снова наполнил Средиземное море. Реки постепенно заполнили песком и илом свои километровые ущелья-каньоны и вернулись в старое русло. Но по характеру отложений под современным руслом этих рек оказалось возможным выявить их русло во время пересыхания Средиземного моря. Такой древний каньон под долиной Нила обнаружил советский геолог И. С. Чумаков во время строительства Асуанской плотины. Ему же и принадлежит гипотеза о пересыхании Средиземного моря.

Остался на дне вновь заполненного моря и слой соли. Покрытая осадками, эта соль не растворилась в новой океанской воде. Несколько экспедиций американского исследовательского судна «Гломар Челленджер», оборудованного устройством для бурения дна моря, показали по колонкам пород, извлеченным из скважин, что высыхание и заполнение Средиземного моря повторялись неоднократно. По крайней мере одиннадцать слоев соли, перемежающиеся осадками, составляют под дном современного Средиземного моря двухкилометровую толщу. По-видимому, одиннадцать раз происходили значительные падения и подъемы уровня мирового океана, одиннадцать раз

полностью высыхало Средиземное море вплоть до открытия Гибралтарского пролива. Произошло это так.

Пять миллионов лет назад колоссальное землетрясение раскололо и на десятки километров сдвинуло кору Земли от Средиземноморья до середины Атлантического океана. Трещина этого сдвига отчетливо видна на карте дна Атлантики. Через образовавшийся разлом шириной в несколько километров и глубиной более тысячи метров в Средиземное море, гремя, как сто Ниагар, хлынули воды Атлантики. После открытия Гибралтара Средиземное море заполнила холодная океанская вода вместе с организмами, характерными для глубин открытого океана. Однако 2 миллиона лет назад Гибралтар обмелел до современной глубины в полкилометра, а воды на дне Средиземного моря прогрелись до 12°C (о течениях в нем рассказывалось в предыдущей главе). Все глубоководные рачки Средиземного моря вымерли от перегрева, и до сих пор глубже 2,5 км оно представляет собой биологическую пустыню.

Вся соль, захороненная на дне Средиземного моря, была в конечном счете извлечена из мирового океана. При этом его соленость, как можно подсчитать, уменьшилась вполне заметно, на 4‰, а после этого очень медленно поднялась и снова достигла прежнего уровня 35‰. Уменьшение солености океана ослабляет таяние льдов, покрывающих его полярные районы. Поэтому граница морских льдов 6—5 миллионов лет назад проходила, по-видимому, южнее современной, альбедо Земли было несколько больше, чем сейчас. Скорее всего климат планеты в это время должен был быть в среднем холоднее и современного климата, и климата до пересыхания Средиземноморья. Все это, напомним, было совсем недавно по сравнению с возрастом Земли, но значительно раньше, чем происходили последние ледниковые периоды.

Во время обычных оледенений соленость океана, напротив, возрастает, так как ледники накапливают пресную воду. Понижение уровня океана на 100 м увеличивает его соленость на 1‰. Изменение солености и перемещение береговой черты при падении уровня океана может привести к изменению его основных течений. Это в свою очередь оказывает сильное об-

ратное воздействие на климат. По какой же причине система течений мирового океана так чувствительна к изменению его солености? Ответ не так прост.

Температура океанских вод на глубинах, больших полутора километров, опускается до $2-3^{\circ}\text{C}$ почти независимо от широты. Поэтому в мировом океане содержатся огромные запасы холода. Посудите сами, это же почти парадокс: средняя температура земной поверхности равна 15°C , температура земных недр тоже высока (на глубине 7 км она всегда превышает 200°C), а на промежуточных глубинах и на суше, и в океане температура имеет минимум. По аналогии с парниковым эффектом, обеспечивающим высокую температуру атмосферы у поверхности Земли по сравнению с равновесной радиационной температурой планеты, это явление — холод океанских глубин и подповерхностный холод почвы — можно назвать эффектом погребя.

Почему же теплопроводность не выравнивает температуру глубинных вод океана тепловыми потоками и снизу, и сверху? — По той же причине, по которой в подземельях температура всегда оказывается ниже среднегодовой температуры поверхности. Эта причина — осенне-зимняя конвекция подземных и океанских вод.

За лето солнечные лучи прогревают только самый верхний слой поверхности — около ста метров воды океанов и морей и только 1—2 м почвы. Поскольку плотность теплой поверхностной воды меньше, чем плотность непрогретой воды снизу, то их перемешивание весной и летом происходит очень медленно. Другое дело — осенью и зимой. Охлажденная (особенно ночью) поверхностная вода оказывается тяжелее подстилающей ее воды, которая успела прогреться за предшествовавший теплый сезон. Начинается конвекция. Опускание холодной воды вниз и замещающий ее подъем теплой воды дают в результате тепловой поток, направленный вверх. Он существенно больше, чем тепловые потоки, рожденные теплопроводностью.

Между осенне-зимней конвекцией грунтовых вод и охлаждением океанских глубин есть, однако, и важные различия. Во-первых, плотность почти пресной грунтовой воды максимальна при 4°C , поэтому кон-

векция грунтовых вод и вод пресных озер прекращается, как только температура поверхности опускается ниже $+4^{\circ}\text{C}$. По этой причине примерно такова в средних широтах температура подземелий и температура на дне глубоких озер. В тропиках пониженная температура грунтовых вод определяется не столько контрастом лето—зима, сколько разностью дневных и ночных температур. Вода же океана с соленостью 35‰ не имеет температурного максимума плотности. Она чем холоднее, тем тяжелее, вплоть до температуры -2°C , когда в ней появляются кристаллики льда.

Во-вторых, осеинная конвекция в почве и озерах имеет малые горизонтальные размеры. Зимнее же опускание холодных вод океана (даунвеллинг) отнюдь не приводит к подъему вод в том же месте, а порождает термохалинные течения большого масштаба и апвеллинг на очень больших расстояниях. Посмотрите еще раз на рис. 40.

В результате этой конвекции в глубинах океана накопилась очень большая отрицательная тепловая энергия, отрицательная потому, что средняя температура океана $T_{\text{ок}} = 3,5^{\circ}\text{C}$ меньше средней температуры земной поверхности $T_{\text{пов}} = 15^{\circ}\text{C}$. Природа, как вы видите, изобрела способ «заматания под ковер» полярного холода, пряча его в океанских глубинах. Оценим этот запас холода:

$$Q \simeq m_{\text{ок}} c_0 (T_{\text{пов}} - T_{\text{ок}}) \simeq 6 \cdot 10^{25} \text{ Дж.}$$

Ясно, что даже небольшое возмущение сложившейся системы течений может перемешать часть глубинных вод с поверхностными и привести к заметному похолоданию климата. Интересно сравнить запас холода мирового океана с той энергией, которая была затрачена на таяние ледников последнего ледникового периода. Уровень океана в то время был ниже современного примерно на $h = 80$ м, следовательно, масса льдов, покрывавших сушу, равнялась массе воды в верхнем слое океана с этой толщиной, т. е. $m_{\text{л}} \simeq 0,7 \cdot 4\pi R_{\oplus}^2 h \rho \simeq 3 \cdot 10^{19}$ кг. Пренебрежем оледенением самого океана. Чтобы растопить эту массу льда, нужна энергия около 10^{25} Дж. Такую тепловую энергию вся Земля получает от Солнца за 2,5 года, но расходуется она, как вы уже знаете, на инфракрасное из-

лучение нашей планеты. Эта энергия, однако, меньше, но того же порядка, что и современный дефицит тепловой энергии океана, его запас холода. Поэтому всякое усиление перемешивания глубинных вод океана с поверхностными приводит к похолоданию климата, а очень интенсивное их смешение может вызвать даже ледниковый период.

Кроме постоянных ветровых течений, почти регулярный вклад в перемешивание океанских вод дают ураганы (тайфуны). Эти перемещающиеся глубокие циклоны (рекордно низкое давление у поверхности составляет 0,85 от нормального) возникают в среднем 6 раз в год (от 0 до 13) в западных тропических областях Тихого и Атлантического океанов. Ураганный ветер со скоростью до 50 м/с разгоняет 30-метровые волны, кинетическая энергия урагана достигает 10^{19} Дж. Выделение этой энергии, превращение ее в тепло, однако, не согревает, а охлаждает поверхность океана. Ураганы интенсивно перемешивают тропический океан до глубины 200—400 м в полосе шириной порядка ста километров. После прохождения урагана вода в таком следе долго остается на несколько градусов холоднее.

Кратковременное воздействие на климат оказывают извержения вулканов. Пыль и дым, которые они выбрасывают на большую высоту, разносятся ветрами верхней тропосферы вокруг всей Земли. Изредка дымный столб извержения подымается даже в стратосферу. Для полного осаждения этой пыли нужны годы. Пыль рассеивает солнечный свет, отчего альбедо Земли временно возрастает.

Так, 27 августа 1883 года произошел взрыв вулкана Кракатау, самый мощный за исторический период взрыв на поверхности Земли. Волна-цунами, вызванная падением отколовшейся части острова Кракатау, трижды обогнула земной шар. Уже в конце ноября 1883 года в Европе наблюдались необычные оптические явления: при закате Солнца все небо на несколько часов становилось пурпурным. Это рассеивал солнечный свет слой пыли, выброшенной вулканом в стратосферу. Несколько следующих лет подряд погода на всей Земле была холоднее обычного. Заметим, что в данном случае это похолодание могло быть вызвано не только временным увеличением альбедо Земли, но

и частичным смещением океанских вод при прохождении цунами.

Обсуждалась идея о том, что внезапные климатические охлаждения могли в прошлом быть результатом перемешивания вод при падении в океан очень больших метеоритов. Эта причина, однако, не годится для объяснения многократных ледниковых периодов, поскольку крайне мала вероятность падения такого метеорита, который возмутит океан больше, чем взрыв Кракатау.

Отметим еще одно следствие эффекта погребения. Когда в гл. IV обсуждался тепловой баланс Земли, отмечалось, что на сегодняшний день еще не удалось убедиться в том, что тепловой поток уходящего от Земли инфракрасного излучения в точности компенсирует тепловую мощность, приносимую к Земле солнечными лучами. Принципиально возможна ситуация, при которой эти потоки оказываются в среднем равными только за времена порядка нескольких десятков тысячелетий. Иначе говоря, нельзя исключить и возможность того, что в теплые межледниковые периоды прогретая атмосфера излучает в космос на доли процента большую энергию, чем Земля получает от Солнца, а глубины океана постепенно аккумулируют запасы холода. Напротив, в ледниковые периоды охлажденная атмосфера отдает в космос поток энергии, меньший современного, а изменившаяся система течений может накапливать недостающую энергию в объеме, но все еще глубоком океане.

По современным представлениям оба состояния климата Земли, теплое и ледниковое, близки к устойчивости. Переход между ними замедлен, затруднен тепловой инерцией образования и плавления ледников и значительной механической энергией, необходимой для изменения океанских течений. Эти переходы могут происходить под действием многих причин. При этом не обязательно, чтобы это внешнее воздействие было сильным, заметно меняло поток тепловой энергии, приходящий к Земле. Гораздо более существенна длительность внешнего воздействия. С этой точки зрения нельзя исключить и влияние на климат переменного нетеплового излучения Солнца. 11 лет солнечного цикла — слишком малый период, чтобы возмущение ультрафиолетовой части солнечного спектра как-то

сказалось на климате Земли. Но, например, 70 лет минимума Маундера многие ученые считают достаточной причиной для объяснения небольшого похолодания XVII века.

Существует одно внешнее воздействие, хотя на первый взгляд и слабое, но продолжающееся длительные сроки, десятки и сотни тысяч лет. Возможно, не оно непосредственно изменяет климат от теплого состояния к ледниковому и обратно. Оно, однако, задает временную шкалу этих перемен, является если не пружиной, то маятником, определяющим ход климатических часов Земли.

Эта причина — изменение эксцентриситета орбиты Земли вокруг Солнца и прецессия оси вращения Земли, воздействующие на климат совместно. Астрономическая теория колебаний климата была создана выдающимся югославским ученым М. Миланковичем в двадцатые годы нашего столетия. Эта теория дала возможность вычислить времена ледниковых периодов прошлого. С точностью до неопределенностей геологических датировок возрасты десятка предыдущих оледенений совпали с предсказанными этой теорией. Она же позволяет ответить и на вопрос, когда должно наступить ближайшее следующее оледенение Земли.

4. Холодное «дыхание» эклиптики

Вот как рассуждал Миланкович. Эксцентриситет земной орбиты меняется под действием малых возмущений других планет (рис. 11). Он может достигать значения $e_{\max} = 0,0658$, что не так уж и мало. Характерный период изменения эксцентриситета около 100 тысяч лет. Кроме того, с периодом 26 тысяч лет прецессирует земная ось, и угол наклона оси Земли к плоскости эклиптики тоже колеблется с периодом 41 тысяча лет (рис. 22). Поэтому условия освещенности нашей планеты Солнцем существенно изменяются на протяжении как раз таких времен, которые по порядку величины близки временам смены ледниковых эпох. Может быть, совокупность этих астрономических явлений и вызывала многочисленные оледенения Земли?

Посмотрим сначала, как изменяется освещенность Земли Солнцем в течение одного года из-за эллиптич-

ности земной орбиты. В перигелии расстояние до Солнца равно $a_{\oplus}(1 - e)$, оно меньше среднего расстояния $a_{\oplus}$. Мощность, получаемая Землей от Солнца, обратно пропорциональна квадрату расстояния. Поэтому вблизи перигелия она относится к средней мощности, как $(1 - e)^{-2} \simeq 1 + 2e$. В момент прохождения перигелия земная поверхность освещается лучше, на Земле относительно теплее. Но скорость движения Земли по орбите вблизи перигелия больше средней, она пропорциональна $\sqrt{(1 + e)/(1 - e)} \simeq 1 + e$. Поэтому планета довольно быстро уходит с той части своей орбиты, где освещенность ее поверхности больше.

Напротив, в афелии расстояние до Солнца большое, $a_{\oplus}(1 + e)$, а освещенность Земли солнечными лучами относительно мала, она пропорциональна $(1 + e)^{-2} \simeq 1 - 2e$. Времени же в удаленной от Солнца части орбиты Земля проводит относительно много, так как скорость там невелика, она меньше средней в отношении $\sqrt{(1 - e)/(1 + e)} \simeq 1 - e$.

Спрашивается, если среднее расстояние до Солнца неизменно, а меняется только эксцентриситет орбиты, то зависит ли от него годовая сумма тепла, получаемая от Солнца? Для ответа нужно просуммировать за год мощность солнечного излучения, попадающую на Землю. Оказывается, что зависимость от эксцентриситета есть, но зависит годовая энергия от e не сильно, пропорционально $(1 - e^2)^{-1/2} \simeq 1 + 0,5e^2$.

Получается, что чем больше эксцентриситет, тем больше средняя освещенность Земли, но разница эта очень невелика. Так, сейчас, когда наш эксцентриситет равен 0,0167, тепла мы получаем больше по сравнению с круговой орбитой всего на 0,014%. И даже при максимальном эксцентриситете Земли средняя энергия, получаемая за год, увеличится всего на 0,2%.

Поскольку нас интересует средняя температура Земли, то при извлечении корня четвертой степени из годовой суммы тепла эти малые поправки еще в 4 раза уменьшаются. Влияние эллиптичности орбиты окажется просто ничтожно. Так что можно считать, что Земля получает от Солнца каждый год одно и то же количество энергии, каков бы ни был эксцентриситет ее орбиты.

Но обратите внимание, говорил Миланкович, что в течение года солнечная мощность колеблется совсем не так слабо: разность между освещенностями Земли в перигелии и афелии относится к средней освещенности, как 4 е. Таким образом, при больших эксцентриситетах она может достигать величины 0,26, а это перепад на четверть средней величины! Надо поэтому посмотреть, как изменяются суммы тепла, получаемые Землей за отдельные сезоны. А ответ на этот вопрос зависит от того, летом или зимой проходит Земля свой перигелий.

Вы помните, смена времен года определяется наклоном оси вращения Земли к эклиптике, плоскости земной орбиты. Угол этого наклона ϵ сейчас равен $23^{\circ}26'30''$. Он тоже медленно меняется, колеблется от минимальной величины 22° до максимальной $24^{\circ},5$ с периодом, равным 41 тысяче лет. На $2^{\circ},5$ колеблются широты тропиков и полярных кругов. Эти колебания важны для точных расчетов, но не очень существенны для дальнейших качественных рассуждений. Более важно то, что ось вращения Земли, почти не изменяя угла наклона, сама поворачивается, прецессирует вокруг перпендикуляра к эклиптике. С этим явлением мы уже сталкивались при обсуждении устройства нашего календаря. Период прецессии равен 26 тысячам лет. Это время, через которое Полярная звезда опять станет полярной, опять на нее будет направлена ось вращения Земли. Однако сейчас нас интересует не период прецессии по отношению к звездам, а взаимное положение перигелия орбиты и точек летнего и зимнего солнцестояний.

Перигелий орбиты Земли тоже перемещается относительно звезд. Он движется в ту же сторону, куда и сама Земля движется по орбите, только в 100 тысяч раз медленнее. Это означает, что перигелий делает полный оборот по орбите за $T_{\Pi} = 10$ тысяч лет. А точка весеннего равноденствия и с нею точки зимнего и летнего солнцестояний перемещаются по орбите в обратную сторону с периодом $T_{\gamma} = 26$ тысяч лет.

Поэтому, чтобы узнать период T_0 , с которым повторяется взаимное положение перигелия и точки зимнего солнцестояния, нужно сложить угловые скорости

этих точек, т. е. сложить величины, обратные их периодам:

$$\frac{1}{T_0} = \frac{1}{T_{\gamma}} + \frac{1}{T_{\Pi}}; \quad T_0 = 21 \text{ тыс. лет.}$$

Посмотрим конкретно, когда перигелий Земли совпадал с зимним солнцестоянием. Сейчас Земля проходит перигелий 4 января, а зимнее солнцестояние — 22 декабря. Разница составляет 13 дней движения по орбите, или $12^{\circ},65$. За 21 тысячу лет этот угол возрастет до 360° . Поэтому сравнительно недавно, в 1250 году нашей эры, перигелий совпадал с точкой зимнего солнцестояния. В следующий раз он совпадет через 20 тысяч лет *), предыдущее совпадение было 22 тысячи лет назад, а до этого — 45,5 и 69,2 тысячи лет до нашей эры. Эти моменты повторяются не со строгой периодичностью, поскольку в их расчетах принимают во внимание возмущения от всех планет.

Между этими событиями с перигелием совпала точка летнего солнцестояния. Происходило это 11,2; 33,2; 60,1 тысяч лет назад и так далее в прошлое.

Теперь представьте себе один из моментов совпадения перигелия и зимнего солнцестояния. Это положение с точностью до десятка градусов как раз сейчас и осуществляется. Возьмем, однако, для выразительности, эксцентриситет равным 0,06. Таким он был 230 тысяч лет назад, таким он снова станет через 620 тысяч лет. Весеннее равноденствие по-прежнему 21 марта, — именно эта дата зафиксирована в нашем календаре. Но летнее солнцестояние наступит только 28 июня, а осеннее равноденствие отодвинется еще больше, оно придется на 5 октября. Земля медленно движется по удаленной части своей орбиты. Лето северного полушария долгое, но тепла Земля получает мало, снег и ледники тают медленно, вяло. Потом наступает зима. Она продолжается недолго, зимнее солнцестояние наступает 28 декабря, всего через 84 дня после осеннего равноденствия. Солнце близко к Земле, оно ослепительно ярко освещает снежные пустыни, снег днем подтаивает, но ночью все замерзает снова.

*) Но орбита тогда будет почти круговой — см. рис. 11.

Именно такие условия и благоприятны для роста ледников, именно они и способствуют переходу климата в ледниковое состояние. Миланкович писал: «Не суровая зима, а прохладное лето способствует продвижению ледников».

Перенесемся теперь в Южное полушарие. Там, наоборот, долгая суровая зима и короткое, очень жаркое лето. Но океан, покрывающий большую часть южного полушария, за лето прогревается, смягчая вынужденную континентальность климата.

Проходит всего только 11 тысяч лет после описанных событий, и ситуация меняется на противоположную. С перигелием теперь совпадает момент летнего солнцестояния, а эксцентриситет все еще такой же большой. Теперь долгая и суровая зима уже в Северном полушарии. Трещат пятидесятиградусные морозы, но много снега они не прибавляют. Наступает лето, короткое, но жаркое. Ледники быстро тают, уровень океана растет. Ледниковый период сменяется умеренным климатом.

В Южном полушарии условия теперь такие, которые оледенению способствуют. Но там, кроме Антарктиды, и без того покрытой вечными льдами, кроме небольшой полоски Южной Америки ледникам накапливаться негде. А океан за долгое, хотя и прохладное, лето легко освобождается от льдов. В целом по Земле площадь ледников сокращается, альbedo планеты уменьшается, среднегодовая температура растет.

В настоящее время перигелий земной орбиты близок к точке зимнего солнцестояния. Из предыдущих рассуждений следует, что такое положение способствует оледенению. Почему же в этом случае наш климат сейчас не ледниковый? Более того, последние столет оледенение уменьшается, уровень океана растет.

Качественный ответ состоит в том, что сейчас эксцентриситет мал и продолжает уменьшаться. Сейчас он равен 0,0167, через тысячу лет он станет равным 0,0163. Такой величины его недостаточно для вывода климата из относительно устойчивого теплого состояния. А вот 20 тысяч лет назад эксцентриситет был равен 0,020, и язык ледника с гор Скандинавии доходил до Калинина, Балтийского моря тогда вовсе не было.

То, что здесь рассказывалось чисто качественно, Миланкович сумел перевести на язык чисел. Вот какой

наглядный количественный способ предложил он для сравнения иных климатических условий с современными. Сейчас в Северном полушарии средняя широта, на которой нижняя граница ледников опускается до уровня моря, — широта снеговой линии — примерно равна 65° . Севернее ее суша и летом покрыта ледниками, но суши там, внутри Северного полярного круга, не так много. Миланкович вычислял солнечную энергию, поступающую на земную поверхность в районе северной широты 65° за летнюю половину года. Ведь именно освещенность Земли летом Северного полушария вызывает наступление или отступление ледников, а 65° — это именно та широта, где начинается рост ледников, меняющий альбедо планеты. Вычислив летние суммы тепла, которые получала Земля в прошлом на широте 65° , Миланкович посмотрел, на какой широте современная летняя сумма тепла равна вычисленным.

Если эта эквивалентная широта в прошлом получается равной, скажем, 69° , то это означает, что в тот момент на широте 65° климатические условия были близки к тем, которые ныне на широте 69° . Следовательно, граница оледенения при таких условиях сместится примерно на 4° к югу, и ледники покроют обширные пространства суши в Канаде, Скандинавии, Восточной Сибири. При таких условиях альбедо Земли возрастет настолько, что климат может перейти в ледниковое состояние. Напротив, если эквивалентная широта в какой-то момент стала меньше 65° , это означает, что в эту эпоху оледенение Северного полушария Земли, а с ним и Земли в целом, уменьшается.

Посмотрите теперь, как менялись эквивалентные широты в прошлом и как они будут меняться в будущем (рис. 53, а). Зачерненные участки отмечают те промежутки времени, когда эквивалентная широта подходит к 69° , — именно эти периоды и следует сравнивать с геологическими датировками предшествовавших оледенений. Эти кривые были вычислены советскими астрономами Ш. Г. Шараф и Н. А. Будниковой по теории Миланковича, но с более точными астрономическими данными об изменении параметров земной орбиты и наклона оси Земли.

Под кривой эквивалентной широты для сравнения приведены (рис. 53, б) данные о температуре в прош-

лом вод Карибского моря (оно расположено в тропиках). Эти данные получены радиоизотопным методом, использующим тот факт, что содержание в воде тяжелого изотопа кислорода ^{18}O зависит от температуры. Видно, что даже в далеком от ледников водном бассейне, где нет эффективной смены сезонов, в ледниковые эпохи температура опускалась на несколько градусов. Это свидетельствует о том, что ледники воздействуют на климат Земли в целом.

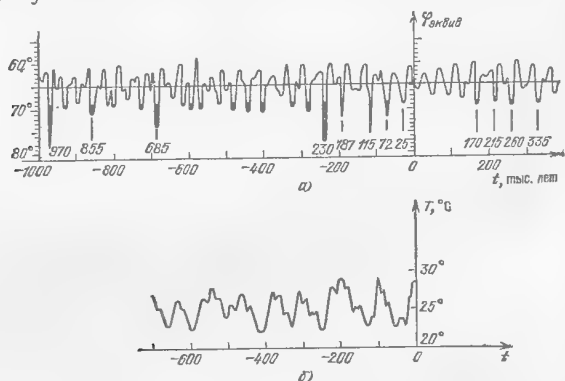


Рис. 53. Изменение эквивалентной широты Миланковича (а) и температура Карибского моря за последние 700 тысяч лет (б).

При разглядывании этих кривых следует помнить, что не только планеты воздействуют на климат, и не только от летней освещенности 65-го градуса он зависит. На реальное положение границы ледников существенно влияет их собственная предыстория — тепловая инерция ледников велика. Так, после сильного оледенения, случившегося, например, 115 тысяч лет назад, ледники и при большой летней освещенности не успевали растаять до конца. Поэтому следующие, меньшие по амплитуде ледниковые периоды, — минимумы рис. 53, бывшие 72 и 25 тысяч лет назад, — хотя и не глубокие, приводили к значительным оледенениям. Теория Миланковича не предсказывает климат точно, она задает климатический ритм.

Реальные границы ледников, конечно, не проходили точно по параллелям. Например, в Западной Сибири даже в достаточно высоких широтах обширные ледники не образовывались. Главная причина этой

аномалии, по-видимому, в том, что в Западной Сибири отсутствуют значительные горные массивы. Именно горы становятся ядрами, зародышами больших ледников, сползающих на равнины. Другая причина отсутствия оледенения — континентальность климата Западной Сибири, малое количество осадков. В таких условиях за суровые зимы земля, не прикрытая снегом, сильно промерзает вглубь. Так образуется вечная мерзлота. Несмотря на тепловой поток из недр Земли (о нем говорилось в гл. III), вечная мерзлота может достигать километровой глубины. Она не исчезает совсем и в теплые периоды межледниковий.

5. Климат и цивилизация

Последний ледниковый период закончился около 10 тысяч лет назад. Этому моменту соответствует последний в прошлом максимум рис. 53, а. Граница ледников отодвинулась на север и выше в горы, уровень океана стал быстро возрастать и примерно 6 тысяч лет назад достиг современного. Обширные пространства Европы, освободившиеся от ледников, начали заселяться народами, жившими в тропической зоне. В этом процессе более других преуспели выходцы с полуострова Индостан и с Иранского нагорья. Языки большинства европейских народов имеют общие корни с языком древней Индии, санскритом. Поэтому же одна из основных рас человечества называется индо-европейской.

Переселение народов способствовало их общению, распространению знаний. Благоприятные климатические условия дали толчок развитию скотоводства и земледелия. Люди, освободившиеся от постоянной борьбы с суровой природой, стали развиваться духовно. Примерно в это же время возникают первые системы письменности — главный признак нашей цивилизации. Открылась возможность передачи накопленных знаний не только изустно, от поколения к поколению, но и письменно — далеким потомкам и на большие расстояния. Сумма накопленных знаний стала расти темпами, дотоле невозможными.

Для чего, прежде всего, нужна письменность современному человеку? — Пожалуй, для передачи технологий — способов производства материальных благ.

Эта возможность, однако, отнюдь не была стимулом для возникновения письменности в древнем мире. Секреты ремесла благополучно передавались по наследству, в рамках семьи, вплоть до эпохи Возрождения, до XV—XVI веков нашей эры.

Исторически наиболее важную роль в осознании необходимости письменности, по-видимому, сыграла возможность записи астрономических и климатических событий, их сопоставление и анализ за большие по сравнению с жизнью одного поколения промежутки времени. В результате — возможность предсказания аналогичных событий, немыслимая без письменности.

Периодичность лунных фаз, конечно, можно заметить и простым счетом дней. Но уже создание примитивного 365-дневного солнечного календаря в Древнем Египте требовало многолетних наблюдений за звездным небом, записи разливов Нила, сопоставления их с первым весенним появлением над горизонтом Сириуса — самой яркой звезды. Не нужно недооценивать объем умственной работы древних. Например, предсказание лунных затмений было доступно уже во II тысячелетии до нашей эры древним астрономам Китая и Вавилона. А сможете ли вы, прошедшие курс школьной астрономии, по записям положений Луны среди созвездий вычислить ночь ближайшего лунного затмения? Очень это сомнительно.

Воздействие климата на развитие человечества, конечно, было очень существенным и до рождения цивилизации. При этом положительную роль играли не только теплые промежутки межледниковий, «золотые века» расцвета, но и похолодания при наступлении ледников. Вполне возможно, что переменность климата Земли, смена теплых и холодных эпох с периодичностью 40—200 тысяч лет была необходимым условием для самого образования человека как биологического вида. Труд, мышление, речь стимулировались в условиях преодолимого кризиса, холод спланивал первобытные коллективы. Поддержание огня, а затем и способ его добычи трением также были изобретены для борьбы с холодом.

И распространение человека по всем континентам из Азии и Африки стало возможным тоже благодаря ледниковым периодам. Понижение уровня океана во время оледенений соединяет с материком острова, со-

единяет между собой континенты. В частности, исчезал Берингов пролив, отделяющий Чукотский полуостров от Аляски. Считается, что именно во время последнего ледникового периода народы Северо-Восточной Азии перешли по образовавшемуся перешейку на Американский континент еще до полного оледенения Аляски, а затем расселились по всей Северной и Южной Америке. Эти представления основаны на том, что индейцы Америки этнически близки к монголам и татарам. В то же время нет свидетельств обитания человека на Американском континенте древнее двух десятков тысячелетий.

Австралия также была заселена из Азии. Произошло это, однако, еще раньше, 75—100 тысяч лет назад. Аборигены Австралии сейчас этнически очень далеки от большинства народов Юго-Восточной Азии. В последний ледниковый период расстояние между Азией и Австралией было слишком велико для миграции. Непрерывного соединения этих континентов не было даже при самых больших оледенениях, понижавших уровень океана на 120—150 м. Однако при таком обмелении океана современные острова Индонезии смыкались с полуостровом Индокитай, а от Австралии и Новой Гвинеи их отделял только узкий пролив шириной около 100 км. Приходится допускать, что даже в столь древние времена люди уже могли организованно преодолевать такие водные преграды.

Вернемся, однако, к началу нашей цивилизации, родившейся 6—7 тысяч лет назад. Письменность — не единственный признак ее отличия от первобытного общества. Примерно в это же время человечество вышло из каменного века — научилось обрабатывать самородные металлы (медь, серебро, золото), затем выплавлять бронзу, появились речные и морские суда, наконец, было изобретено колесо. Все последующее развитие общества укладывается в схему: социальные следствия как результат развития технологии.

Тем не менее именно изобретение письма дало то главное, что отличает цивилизацию от предыдущего существования человечества. Письменность не только дала возможность предвидеть будущее анализом истории. Ее социальная роль в том, что она перестроила управление коллективами, внесла в управление жесткую обратную связь. За письменным приказом сверху

неизбежно следует письменный отчет снизу. Нарушение приказа вызывает наказание на основе записанных законов.

Усиление управления сплотило мелкие общины, состоявшие из нескольких семей, в большие государства. Экономическое преимущество объединения людей дало толчок резкому росту населения Земли. Несмотря на эпидемии и войны, вот уже несколько тысячелетий продолжается все ускоряющийся рост численности человечества — время удвоения населения почти монотонно сокращается. Так потепление климата после окончания ледникового периода стимулировало прогресс человечества. Но и человек влияет на климат.

Первые признаки изменения климата отдельных районов в результате человеческой деятельности можно отметить уже на заре цивилизации. Горы Древней Греции, как известно из поэм Гомера, были покрыты густым лесом. Сейчас это голые скалы. Их травяной покров был вытоптан стадами домашних коз — из всех домашних животных они нарушают его наиболее сильно.

Другой, и более значительный пример — пустыня Сахара. Как показывает бурение долины Нила, эта пустыня, самая большая на планете, образовалась только около 6 тысяч лет назад. В более ранних слоях осадков нет эолового, т. е. принесенного ветром, песка, во всех же верхних горизонтах присутствуют неокатанные водой песчинки сахарского происхождения. Это означает, что Сахары не существовало во время теплых промежутков между древними ледниковыми периодами. Скорее всего и она — результат деятельности человека, пасшего стада на непрочном травяном покрове.

Альbedo песчаных пустынь выше, чем альbedo участков, покрытых растительностью. В то же время сухость воздуха пустынь способствует их радиационному охлаждению. Поэтому пустыни, в том числе и Сахара, занимающая 6 % территории суши, дополнительно охлаждают Землю. А сегодняшние лесонасаждения и орошение засушливых земель человеком положительно влияют на климат.

Климат Земли за последнее столетие заметно потеплел. Особенно явно это потепление проходило с

1890 по 1940 годы. Среднегодовая температура Северного полушария повысилась на 0,6 градуса, ледники отступали в горы, граница вечной мерзлоты отодвинулась на север, на несколько градусов севернее стала проходить и граница постоянных морских льдов. Данные по Южному полушарию недостаточны для уверенного суждения о потеплении. В целом климат Земли все же изменился в положительную сторону, поскольку уровень океана за эти 50 лет поднялся на 10 см.

Конкретная причина этого потепления, к сожалению, не ясна. Объяснение его результатами деятельности человека не выглядит убедительным, потому что последние 30 лет отнюдь не показали дальнейшего потепления. Средняя температура земной поверхности стабилизировалась, а в Северном полушарии даже опустилась на 0,2 градуса, уровень океана с 1950 года колебался в пределах ± 3 см, но в среднем оставался почти постоянным.

Заметьте, что долговременная тенденция климата, следующая из теории Миланковича, сейчас отрицательна, изменение астрономических параметров способствует похолоданию. Как видно из рис. 53, *а*, летняя освещенность Северного полушария в настоящее время убывает, а через 20 тысяч лет она достигнет минимума. Ближайший минимум, однако, не глубок. Это связано с тем, что эксцентриситет земной орбиты как раз в это время будет почти нулевым, а к ледниковым периодам приводит только большой эксцентриситет. Поэтому ближайшее климатическое будущее Земли не внушает опасений. «Расположение светила», как сказал бы астролог, благоприятствует похолоданию. Но за последнее столетие в результате человеческой деятельности появился новый фактор, несомненно воздействующий на климат в сторону потепления.

Количество угля, нефти и газа, сожженного человечеством, стало вносить малый, но доступный измерениям вклад в содержание атмосферной углекислоты. Кроме того, CO_2 в заметных количествах образуется при производстве цемента. Углекислый газ, как и пары воды, поглощает инфракрасное излучение, т. е. способствует парниковому эффекту. Поэтому распространено мнение, что увеличение добычи полезных ис-

копаемых может достаточно быстро привести к заметному потеплению атмосферы.

Действительно, сейчас за год в составе топлива сжигается около $5 \cdot 10^{12}$ кг углерода, извлеченного из геологических отложений. Образующийся при этом углекислый газ составляет $2 \cdot 10^{13}$ кг или 1% от его полиой массы в нашей атмосфере. Это, однако, не означает, что содержание углекислоты в атмосфере возрастает именно с такой скоростью.

Сейчас доля углекислого газа равна $3,37 \cdot 10^{-4}$ от всей массы атмосферы. 20 лет назад его содержание было заметно меньше: $3,18 \cdot 10^{-4}$. Следовательно, ежегодно количество CO_2 растет на 10^{-6} от полной массы атмосферы, т. е. на $5 \cdot 10^{12}$ кг. Вы видите, что реально измеряемый прирост концентрации оказался в 3—4 раза меньше того, что можно было бы ожидать от подсчета сжигаемого топлива. Куда же исчезает остальная углекислота?

Причина этого расхождения в том, что углекислый газ хорошо растворяется в океанской воде. Растворенную углекислоту расходует при фотосинтезе фитопланктон — одноклеточные хлорофилловые организмы, живущие в верхнем слое всего океана. Кроме того, углекислота в океане не только растворяется, но и вступает в химическую реакцию $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Мел, углекислый кальций CaCO_3 , в огромных количествах осажден на океанском дне в виде отмерших раковин и коралловых скелетов. Эта химическая реакция растворяет меловые отложения, поскольку гидрокарбонат кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ растворим в океанской воде гораздо лучше мела. Из-за этой реакции довольно трудно ответить на вопрос, сколько именно углекислоты растворено сейчас в океане. Но можно с уверенностью сказать, что океан в принципе способен поглотить количество углекислого газа, намного превосходящее его атмосферную массу. Этот процесс, правда, недостаточно быстр. Только из-за малой скорости растворения углекислого газа и малой скорости этой химической реакции мы и регистрируем некоторое увеличение ее атмосферного содержания.

Допустим на мгновение, что концентрация углекислоты в атмосфере удвоится. Это привело бы к увеличению средней температуры земной поверхности

на 2—3 градуса. Потепление было бы особенно заметно в полярных районах, там средняя температура поднялась бы даже на 6—8 градусов — летом весь Северный Ледовитый океан освобождался бы ото льдов. Увы, удвоение содержания в атмосфере, по-видимому, никогда не сможет быть достигнуто. Во-первых, потому, что скорость поглощения углекислого газа океаном увеличивается с ростом его концентрации в атмосфере, во-вторых, в теплом климате будет более активен фотосинтез, переводящий углекислоту в органику растений и на суше, и в океане.

Нам, однако, нужно заботиться не только о потеплении климата, но и о том, чтобы не допустить перегрева Земли, особенно в тропических районах, на широтах пояса пустынь. Существенное потепление, кроме того, приведет к тому, что сократятся ледники Антарктиды и Гренландии, подымется уровень океана. В результате сократится территория суши, под водой окажутся плодородные прибрежные районы. Экономический эффект потепления для Земли в целом будет, скорее, отрицательным.

Интересно оценить, как скоро скажется на климате непосредственное выделение тепла мировой энергетикой. При этом нужно подсчитывать, конечно, только энергию, получаемую от сжигания геологических топлив, и атомную энергию. Сжигание дров и сельскохозяйственных отходов, прямое превращение солнечной энергии в другие виды, гидроэлектростанции и ветровые двигатели используют, прямо или косвенно, энергию солнечного излучения. Солнечная энергия и так учтена при определении теплового равновесия Земли. Речь идет лишь о дополнительной энергии. Вся она в конечном счете переходит в тепло и вносит независимый вклад в нагрев планеты.

Массу сжигаемого ежегодно углерода мы знаем, поэтому нетрудно оценить и выделение энергии (атомные станции вносят пока еще небольшой вклад). В результате оказывается, что дополнительная тепловая мощность сейчас равна $2 \cdot 10^{20}$ Дж/год или $6 \cdot 10^{12}$ Вт. Вы видите, уже сегодня мировая энергетика дает по порядку величины почти столько же тепловой энергии, сколько и тепловой поток из недр всей Земли (гл. IV). Оба этих энергетических потока не суще-

ственные на фоне потока энергии Солнца. Но что ждет нас в будущем?

Потребление энергии в мире растет очень быстро. В начале века оно удваивалось за 50 лет, сейчас — меньше чем за 20 лет. Истощение легкодоступных запасов нефти и газа не остановит энергетического прогресса. Угля хватит надолго. В далекой перспективе будет освоено получение энергии термоядерным синтезом. В течение же ближайшего полувека нефтегазовая энергетика будет полностью заменена атомной. Запасы урана вполне достаточны. Уже сегодня можно использовать не только редкий в природе изотоп ^{235}U , но и распространенный ^{238}U . Ядерное горючее размножают быстрыми нейтронами, используя реакцию $^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{Pu}$. Плутоний — такое же удобное горючее ядерных реакторов, как и ^{235}U . Быстрые нейтроны для реакции образования плутония возникают в реакторе при распаде ^{235}U или ^{239}Pu . Поэтому этот процесс называют размножением ядерного горючего.

Ввиду этих перспектив можно ожидать, что время удвоения энергетики и в будущем останется близким к 20 годам. Это означает, что уже через 200 лет производство энергии на Земле достигнет 10^{16} Вт, 5% тепловой мощности Солнца, попадающей на Землю. Такая энергетика повысит среднюю температуру Земли уже на опасную величину — на 3 градуса.

К тому времени, однако, наши потомки освоят точное управление климатом. Технически это можно достичь уже сегодня изменением альбедо земной поверхности и постройкой плотин в проливах для регулирования океанских течений. Воплощению конкретных проектов препятствует пока недостаточная способность предсказывать ожидаемые эффекты. Но главное, пожалуй, в том, что все мы еще не осознаем достаточно глубоко необходимости объединения усилий всего человечества для решения таких глобальных задач.

Наука о Земле, о связи Земли с космосом всегда была наукой эмоционально очень глубокой. Да и нужно ли сдерживать чувство восторга, возникающее при сознании, что у нас есть возможность понять величественные явления природы. Вспомним же, как совсем недавно пел Владимир Высоцкий:

Лей звездный дождь, вселяя в наши души
Землей и морем вечную болезнь,

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. ПУТЬ ЗЕМЛИ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВО ВРЕМЕНИ	5
1. Звездное небо	5
2. Космологическая шкала времени	11
3. Свет Большого Взрыва	16
4. Движение Земли и планет вокруг Солнца	26
Глава II. ПОДВИЖНАЯ ТВЕРДЬ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ	40
1. Кинематика вращения Земли	40
2. Физические основы календаря	46
3. Вращение Луны и планет	49
4. Фигуры небесных тел	55
5. Земля и Луна	62
Глава III. СОЛНЦЕ — ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ	71
1. Первые сведения о Солнце	71
2. Недра Солнца	75
3. Энергия ядерных реакций	81
4. Может ли Солнце взорваться?	88
5. Поверхность Солнца	96
Глава IV. АТМОСФЕРА И ОКЕАН	106
1. Состав атмосферы	106
2. Тепловое равновесие планет. Их атмосферы и океаны	111
3. «Слоеный пирог» земной атмосферы	120
4. Ветры Земли	128
5. Мировой океан, его течения	142
Глава V. КЛИМАТ ЗЕМЛИ	158
1. Облака	158
2. Что такое погода, что такое климат	167
3. Причины изменения климата	182
4. Холодное «дыхание» эклиптики	192
5. Климат и цивилизация	199

Алексей Владимирович Бялко

НАША ПЛАНЕТА — ЗЕМЛЯ

(Серия: Библиотечка «Квант»)

Редактор *И. Е. Рахлин*

Технический редактор *Л. В. Лихачева*

Корректор *Н. Д. Дорохова*

ИБ № 12265

Сдано в набор 08.02.83. Подписано к печати 26.09.83. Т-19215. Формат 84×108¹/₃₂.
Бумага тип. книжно-журнальная. Литературная гарнитура. Высокая
печать. Услови. печ. л. 10,92. Уч.-изд. л. 10,88. Тираж 150 000 экз. Заказ № 629.
Цена 35 коп.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового
Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга»
им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете
СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 198052, г. Ле-
нинград, Л-52, Измайловский проспект, 29.